

UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA
CENTRO UNIVERSITARIO DE CIENCIAS BIOLÓGICAS Y AGROPECUARIAS



**ALTERACIÓN EN LOS ESCURRIMIENTOS EN LA CUENCA
LECHUGUILLA-OHUIRA-NAVACHISTE, SINALOA ASOCIADOS A LOS
CAMBIOS DE COBERTURA Y USO DEL TERRENO**

**TRABAJO DE TITULACIÓN EN LA MODALIDAD DE
TESIS**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
LICENCIADO EN BIOLOGÍA

PRESENTA
HUGO ORLANDO COVARRUBIAS LEGASPI

Las Agujas, Zapopan, Jal., Diciembre de 2005



Universidad de Guadalajara
Centro Universitario de Ciencias Biológicas y
Agropecuarias

Coordinación de Titulación y Carrera de Licenciatura
en Biología

074/ C. C/BIOLOGÍA

C. HUGO ORLANDO COVARRUBIAS LEGASPI
PRESENTE

Manifestamos a usted que con esta fecha ha sido aprobado su tema de titulación en la modalidad de: **TESIS E INFORMES** opción **TESIS** con el título : **"ALTERACIÓN DE LOS ESCURRIMIENTOS EN LA CUENCA LECHUGILLA-OHUIRA-NAVACHISTE SINALOA ASOCIADOS A LOS CAMBIOS DE COBERTURA Y USO DEL TERRENO"** para obtener la Licenciatura en Biología.

Al mismo tiempo le informamos que ha sido aceptado como Director / a de dicho trabajo al **M en C. CESAR ALEJANDRO BERLANGA ROBLES** y el Asesor / a es: **ING. HÉCTOR GERARDO FRÍAS URENA.**

Sin más por el momento, le envío un caluroso saludo.

ATENTAMENTE
"PIENSA Y TRABAJA"

Las Agujas, Zapopan., 4 de Septiembre del 2005.


DR. CARLOS ÁLVAREZ MOYA
PRESIDENTE DEL COMITÉ DE TITULACIÓN



COORDINACIÓN DE LA CARRERA DE
BIOLOGÍA


DRA. LAURA GUADALUPE MEDINA CEJA
SECRETARIO DEL COMITÉ DE TITULACIÓN

C.c.p. M en C. CESAR ALEJANDRO BERLANGA ROBLES - Director del trabajo

Dr. Carlos Álvarez Moya.
 Presidente del Comité de Titulación.
 Carrera de Licenciado en Biología.
 CUCBA.
 Presente

Nos permitimos informar a usted que habiendo revisado el trabajo de titulación, modalidad Tesis e Informes, opción Tesis con el título: "Alteración en los escurrimientos en la Cuenca Lechuguilla-Ohuira-Navachiste, Sinaloa asociados a los cambios de cobertura y uso del terreno" que realizó el/la pasante Hugo Orlando Covarrubias Legaspi con número de código 395224989 consideramos que ha quedado debidamente concluido, por lo que ponemos a su consideración el escrito final para autorizar su impresión.

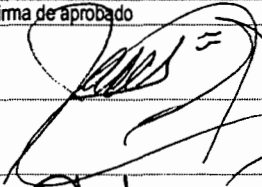

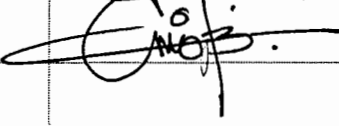
Sin otro particular quedamos de usted con un cordial saludo.

Atentamente
 Las Agujas, Zapopan, Jalisco a 07 de Noviembre de 2005


 César A. Berlanga Robles
 M.en.C. César Alejandro Berlanga Robles
 Director/a del trabajo


 Ing. Héctor Gerardo Frías Uréña
 Asesor(es)



Nombre completo de los Sinodales asignados por el Comité de Titulación	Firma de aprobado	Fecha de aprobación
Dr. José Ariel Ruiz Corral		29/11/2005
M.en.C. Ramón Ceja Ramírez		28/11/05
M.en.C. Guillermo Barba Calvillo		11/11/2005
Supl. Ing. Jorge Pedro Topete Ángel		

DEDICATORIA

A Dios.....

A mis Padres, por todo el apoyo y fortaleza que me han dado sin pedir nada a cambio

A mis hermanas por estar siempre presentes

A cada uno de los que integran mi familia, por siempre confiar en mí.

A mis amigos que me acompañaron durante mi formación profesional, siempre con la mejor calidad humana.

CUCBA



BIBLIOTECA CENTRAL

AGRADECIMIENTOS

Agradezco de forma muy especial a mi director de tesis el M. en C. César Alejandro Berlanga Robles por haberme dado las herramientas y el apoyo necesario para realizar este trabajo de la manera más profesional.

A la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el financiamiento del proyecto: "Cobertura y usos de suelo de la cuenca Lechuguilla-Ohuira-Navachiste, Sinaloa: impacto sobre la estructura e hidrología del paisaje" (Fondos Sectoriales SEMARNAT-CONACYT 2002-C01-112/A-1), dentro del que se desarrollo esta tesis.

A mi asesor el Ingeniero Héctor Gerardo Frías Ureña, por sus valiosas aportaciones las cuales ayudaron a desarrollar un trabajo más claro y completo.

A el comité de tesis, formado por el Dr. José Ariel Ruiz Corral, el M. en C. Ramón Ceja Ramírez, el M en C. Guillermo Barba Calvillo y al Ingeniero Jorge Pedro Topete Ángel por sus oportunas intervenciones cuyo propósito fue mejorar la calidad de este trabajo.

Al Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo A. C. por la beca otorgada para culminar mi tesis y en particular a la Unidad Mazatlán en Acuicultura y Manejo Ambiental por permitirme el uso de sus instalaciones y equipos.

A la M. en C. Lorena Páez Brito y a la M. en C. Nora Alicia Trelles Rios por compartir sus grandes conocimientos para la obtención de herramientas necesarias para la realización de este trabajo y de manera especial por su compañerismo.

De manera particular a Priscila Trujillo Batiz, por el gran apoyo otorgado durante la etapa de digitalización de suelos.

A todos mis compañeros y amigos del LAMA, que aportaron sus conocimientos con mucha humildad con el objetivo de llegar a un buen fin.

A la Universidad de Guadalajara.

CONTENIDO

CONTENIDO.....	i
ÍNDICE DE CUADROS.....	iii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	iv
RESUMEN.....	v
INTRODUCCIÓN.....	1
OBJETIVOS.....	4
Objetivo General.....	4
Objetivos Particulares.....	4
HIPÓTESIS.....	4
ANTECEDENTES.....	5
Generalidades de cuencas hidrológicas.....	5
Escorrentías.....	5
Generalidades de percepción remota y Sistemas de información geográfica.....	8
Método de Número de Curva y modelo L-THIA.....	9
MATERIAL Y MÉTODOS.....	12
Área de estudio.....	12
Metodología.....	14
Mapas de coberturas.....	14
Evaluación de la exactitud de la clasificación.....	16
Análisis de las principales tendencias de cambios.....	18

Análisis de los Impactos del cambio de cobertura y usos del terreno sobre los patrones de escurrimiento de la cuenca Lechuguilla-Ohuira-Navachiste (modelo del Número de Curva)	19
Esquema metodológico	22
RESULTADOS	23
DISCUSIÓN	35
CONCLUSIÓN	39
REFERENCIAS	42

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1.- Sumario de las características de los sensores MSS, TM y ETM+ de los satélites Landsat, utilizadas en este estudio.....	15
Cuadro 2.- Coberturas y usos del terreno utilizados en la clasificación supervisada de imágenes Landsat y digitalización de datos auxiliares para producir mapas temáticos de la cuenca Lechuguilla-Ohuira-Navachiste, Sinaloa.....	16
Cuadro 3.- Grupos hidrológicos de suelos propuesto por USDA (1986) para ser utilizados en el modelo del Número de Curva.....	21
Cuadro 4.- Datos estadísticos de valores de brillantez para los diferentes campos de entrenamiento.....	24
Cuadro 5.- Matriz de error utilizada para evaluar la exactitud global de la clasificación supervisada para el año 2000.....	25
Cuadro 6.- Matriz de detección de cambio de 1973 a 1986 en hectáreas.....	25
Cuadro 7.- Matriz de detección de cambio de 1986 al 2000 en hectáreas.....	26
Cuadro 8.- Matriz de detección de cambio de 1973 al 2000 en hectáreas.....	26
Cuadro 9.- Suelos presentes en el área de estudio con base a la clasificación FAO/UNESCO.....	29
Cuadro 10.- Suelos representados en la cuenca Lechuguilla-Ohuira-Navachiste con sus respectivas áreas, y su correspondencia a los grupos hidrológicos.....	33
Cuadro 11.- Número de curva para las combinaciones de cobertura y grupo hidrológico de suelo.....	33
Cuadro 12.- Volúmenes y profundidades de escurrimientos en la cuenca Lechuguilla-Ohuira-Navachiste, Sinaloa.....	34

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. -Área de estudio: cuenca Lechuguilla-Ohuira-Navachiste, Sinaloa, México.....	12
Figura 2. Mapas temáticos de las coberturas y usos del terreno en la cuenca Lechuguilla-Ohuira-Navachiste de los años 1973,1986 y 2000.....	23
Figura 3. Mapa temático de coberturas y usos del terreno en la cuenca Lechuguilla-Ohuira-Navachiste con base a el modelo del número de curva.....	28
Figura 4. Mapa temático de los diferentes tipos de suelos de acuerdo a la clasificación FAO-UNESCO, presentes en la cuenca Lechuguilla-Ohuira- Navachiste.....	30
Figura 5.- Grupos hidrológicos presentes en la cuenca.....	31
Figura 6.- Mapas temáticos que combinan coberturas y usos del terreno con los grupos hidrológicos de suelos en la cuenca Lechuguilla-Ohuira-Navachiste.....	32

RESUMEN

Los impactos generados en los patrones de escurrimientos a consecuencia de los cambios de coberturas en la cuenca Lechuguilla-Ohuira-Navachiste, ubicada al Noroeste del Estado de Sinaloa fueron evaluados a través del modelo L-THIA el cuál se basa en el método de Número de Curva. El Número de Curva es un parámetro hidrológico usado para describir el escurrimiento potencial en función del uso del terreno, de las características hidrológicas del suelo y de los antecedentes de humedad. En este trabajo, los datos de percepción remota y los sistemas de información geográfica fueron utilizados para estimar los cambios en los escurrimientos. La información acerca de las coberturas presentes en la cuenca surge a partir de clasificaciones supervisadas de imágenes Landsat MSS para 1973 y 1986, y ETM+ para el año 2000, con los cuales se construyó una matriz de detección de cambio. De tal forma que el porcentaje de cambio de 1973 al 2000 fue de un 33%, teniendo a la agricultura como la clase que presentó mayor cambio, desplazando a clases naturales como marismas, manglar y selva principalmente. Los datos sobre los grupos hidrológicos del suelo indican la presencia de la unidad edafológica vertisol con casi un 50% sobre el área de estudio, lo que trae como consecuencia poca permeabilidad en la cuenca. Referente a los volúmenes de escurrimiento los resultados para 1973, 1986 y 2000 muestran poca variación con un 83%, 86% y 77% respectivamente del total del volumen de lluvia escurrida. La disminución de coberturas naturales ha impactado de manera significativa en los escurrimientos a nivel mundial, no obstante en el presente estudio la falta de regularidad de lluvia entre los tres distintos años, no permite visualizar los impactos que han generado los cambios del uso del terreno sobre los patrones de escurrimiento; sin embargo el modelo L-THIA resultó ser una excelente herramienta para determinar los volúmenes de escurrimientos en la cuenca Lechuguilla-Ohuira-Navachiste.

INTRODUCCIÓN

La organización del espacio, entendida como la distribución natural de elementos que integran el medio físico en un territorio donde interactúan elementos bióticos, constituye el principal factor de análisis en los proyectos de ordenación territorial a partir del cual se establecen las directrices y políticas para el aprovechamiento sustentable de los recursos naturales y para la planeación de las actividades antropogénicas a gran escala. (López, 1994; Campbell, 1996).

Los cambios de uso del terreno, relacionados con el desarrollo económico, ambiental y el crecimiento poblacional y tecnológico, están modificando irreversiblemente el entorno (destrucción de la vegetación natural, desplazamiento de especies animales, alteraciones en los caminos del agua) que se traducen en impactos ambientales significativos que alteran los ecosistemas y contribuyen a la transformación de “paisajes naturales” a “paisajes construidos” (Ojiva *et al.*, 1994).

Asimismo, los impactos hidrológicos generados por estos cambios han generado el aumento de volumen de los escurrimientos sobre las superficies terrestres (Bhaduri *et al.*, 2000; Harbor, 1999). Las escorrentías son la porción de precipitación que fluye sobre las superficies terrestres hacia superficies acuáticas y dependen principalmente de la topografía, los tipos de suelo, los usos del terreno y del tiempo e intensidad de la lluvia. El crecimiento de las actividades agropecuarias en los últimos años ha impactado fuertemente en los escurrimientos debido a la reducción de la infiltración a causa de la compactación del suelo (Ma, 2004).

En el estado de Sinaloa los cambios de cobertura y usos del terreno están principalmente asociados al impulso que tiene la agricultura en el norte y centro del estado. De esta manera, las áreas próximas a esteros y lagunas están dominadas por campos agrícolas. En el caso concreto de la cuenca Lechuguilla-Ohuira-Navachiste, localizada al norte del estado, es una de las regiones

con mayor desarrollo agrícola y acuícola de México (Martínez, 2003). La cuenca se localiza primordialmente en los municipios de Ahome y Guasave. Ahome dispone de uno de los recursos hidrológicos más importantes de la vertiente del Pacífico: el río Fuerte, mientras que Guasave mantiene su distrito de riego con aguas del río Sinaloa y contiene un litoral de 50 kilómetros de longitud con una alta densidad de estanquería para el cultivo de camarón (INEGI, 1995). El desarrollo de estas actividades han modificado los procesos del paisaje, sin contar hoy en día, con estudios históricos a nivel regional sobre los patrones de escurrimientos y sus alteraciones.

Los estudios sobre los cambios de cobertura y usos del terreno y sus impactos sobre las funciones de los ecosistemas, como los requeridos en la región norte de Sinaloa, son facilitados por el uso de técnicas de percepción remota que permite una visión amplia y sinóptica del paisaje (Riera et al., 1998). Las técnicas de percepción remota y su complemento con sistemas de información geográfica (SIG) permiten dar seguimiento a los indicadores ambientales en un nivel de paisaje, tales como los cambios en el tamaño y forma de las coberturas vegetales que pudiera tener relación con la biodiversidad y condición de los ambientes de una cuenca (Klemas, 2001).

Las técnicas de percepción remota se basan en la capacidad de los objetos de la superficie terrestre para emitir y reflejar energía en diferentes intervalos del espectro electromagnético (Campbell, 1996). Desde sus inicios, la percepción remota satelital ha tenido un amplio uso en el estudio de las coberturas y los cambios en el uso terreno por tener facilidad de poner en una imagen grandes extensiones de terreno con una resolución adecuada para hacer diferentes tipos de evaluaciones. Esta facilidad permite la creación de mapas que muestren las diferentes coberturas y usos del terreno, al mismo tiempo que elimina los problemas de accesibilidad en áreas de estudio, y proporciona un método repetitivo que registra las características de la superficie terrestre en forma rápida, de bajo costo y de manera objetiva y confiable (Palacios, 1992). Por otro lado, los

sistemas de información geográfica son una eficiente herramienta para la modelación hidrológica por facilitar el manejo, integración e interpretación de los datos disponibles (Melesse, 2003).

Considerando que el estudio de los cambios de las coberturas y usos del terreno y sus repercusiones en los patrones de escurrimiento es fundamental para implementar planes de ordenamiento territorial que permitan el desarrollo sustentable de la cuenca Lechuguilla-Ohuira-Navachiste y de la región norte de Sinaloa; en la presente propuesta se analizaron las modificaciones en los volúmenes de escurrimiento dentro de la cuenca por cambios en la ocupación del terreno, integrando un sistema de información geográfica con mapas de coberturas del terreno derivados de percepción remota, las características hidrológicas del suelo como la textura y la profundidad, y datos de precipitación con el fin de aplicar el Modelo de Número de Curva desarrollado por la Soil Conservation Service (1986) de los Estados Unidos como una herramienta para estimar los cambios en los escurrimientos.

OBJETIVOS

Objetivo General

Evaluar los cambios del escurrimiento potencial y el escurrimiento medio anual en la cuenca Lechuguilla-Ohuira-Navachiste, Sinaloa, por cambios en la cobertura y uso del terreno a través del Modelo del Número de Curva.

Objetivos Particulares

- Determinar los cambios en la cobertura y usos del terreno en la cuenca Lechuguilla-Ohuira-Navachiste, a través del análisis digital histórico de imágenes Landsat MSS (1973 y 1986) y ETM+ (2000).
- Aplicar el Modelo del Número de Curva para evaluar los cambios del escurrimiento potencial y el escurrimiento medio anual en la cuenca Lechuguilla-Ohuira-Navachiste.

HIPÓTESIS

El crecimiento de la frontera agrícola, los asentamientos humanos y la acuicultura en la cuenca Lechuguilla-Ohuira-Navachiste han generado un incremento en los volúmenes de escurrimientos. La aplicación del Modelo del Número de Curva resulta apropiada para evaluar el incremento en volúmenes de escurrimiento por integrar datos de uso del terreno, características hidrológicas del suelo y registros históricos de precipitación.

ANTECEDENTES

Generalidades de cuencas hidrológicas

Una cuenca hidrográfica es la unidad fisiográfica en la que el agua proveniente de la precipitación forma un curso principal de agua (Davis y Wiest, 1993). Las cuencas hidrográficas están conformadas por componentes biofísicos (agua, suelo), biológicos (flora, fauna) y antropogénicos (socioeconómicos, culturales e institucionales), todos interrelacionados y en equilibrio entre sí, de tal manera que al afectarse uno de ellos, se produce un desequilibrio que pone en peligro todo el sistema (Wetzel, 2001), por tanto, las cuencas hidrográficas son consideradas como unidades de planificación del uso del agua debido a la importancia que representan tanto para el hombre como para el medio ambiente.

Los recursos naturales de la cuenca se pueden considerar como no renovables cuando no se les puede reemplazar en un período de tiempo significativo en términos de las actividades humanas a que están sometidos, como puede ser el desarrollo agrícola y ganadero, procesos que resultan especialmente riesgosos cuando se establecen en laderas frágiles y empinadas que se pierden fácilmente como resultado de fuertes lluvias sobre suelos desnudos transformando las formas naturales en formas artificiales (Hynes, 1986; Ramakrishna, 1997).

Escorrentías

Al precipitarse el agua sobre las superficies terrestres una porción se infiltra otra se evapora y una más fluye superficialmente formando la escorrentía (Wetzel, 2001). La escorrentía es la porción de precipitación que fluye hacia los canales, arroyos, lagos y océanos, en forma de corriente superficial, esto se debe a que la intensidad de la lluvia supera la velocidad de infiltración (Ma,

2004). El estudio de la escorrentía de los ríos como parte del ciclo hidrológico incluye la distribución del agua y su trayectoria desde que ésta se precipita sobre la tierra hasta que alcanza la red hidrográfica o vuelve directamente a la atmósfera a través de la evaporación o evapotranspiración (Porta, 2003).

Los principales factores que influyen en el volumen del agua de una cuenca son el fisiográfico y el agroclimático. Dentro de los factores fisiográficos destacan la extensión, forma y pendiente media de la cuenca, por su parte, los agroclimáticos consideran la cantidad, intensidad y duración de la lluvia, la distribución de la precipitación respecto al área de la cuenca, la densidad de la red hidrológica y su capacidad de evacuación, así como las condiciones propias de la superficie del terreno influenciadas por la geología, el tipo y permeabilidad del suelo, las condiciones de humedad y las labores de cultivo realizadas en el mismo suelo. Otro factor importante a considerar es la cobertura vegetal, ya que esta disminuye el efecto del impacto de las gotas de lluvia, intercepta parte del volumen llovido y reduce el escurrimiento a medida que en el área existe más vegetación (Anaya et al., 1991, Treviño *et al.*, 2002).

Al comienzo de una fuerte precipitación, una gran cantidad de agua es interceptada por la vegetación; el agua así almacenada sobre la superficie de la capa vegetal se encuentra muy expuesta al viento y ofrece una enorme área de evaporación, de tal forma que las precipitaciones de corta duración y poca intensidad pueden llegar a ser completamente consumidas por la intercepción, por la pequeña cantidad de agua que se infiltra a través del suelo y por el agua que llena los charcos y las pequeñas depresiones de la superficie del suelo (Davis y Wiest, 1993).

La vegetación natural es uno de los beneficios que presentan los bosques al ayudar a preservar los ciclos hidrológicos y previene problemas de inundación en las partes bajas de las cuencas. La eliminación de la vegetación afecta directamente la disminución de la oferta hídrica y la calidad del recurso, la degradación de hábitat y de la propia cuenca (Hynes, 1986). Así la

presencia de bosques favorece la retención del agua, ya que el sistema radicular permite mayor y mejor infiltración, por el contrario la presencia de laderas deforestadas y abiertas no permiten la retención y favorecen al arrastre de sedimentos hacia las riberas de los ríos.

Para que el agua llegue a infiltrarse, la superficie del suelo debe presentar una serie de condiciones adecuadas. A lo largo de una precipitación, cuando el poder de intercepción y de almacenamiento en la superficie del suelo han sido ya agotados, y cuando la precipitación es tal que su intensidad excede la capacidad de infiltración del suelo, comienza la escorrentía superficial propiamente dicha, la superficie del suelo en ese momento se cubre con una fina película de agua llamada película de retención superficial (Margalef, 1983). Los escurrimientos asociados a las fuertes lluvias y a la deforestación inciden en desastres hidrológico-meteorológicos como son: inundaciones, inestabilidad de laderas, derrumbes, deslaves, pérdidas de suelo, asolvamiento de cauces y vasos de presas, desbordamientos de lagos y lagunas, que aunados al crecimiento demográfico, cada vez son más frecuentes y de consecuencias graves, con daños sociales, políticos y económicos cuantiosos para la nación. Cuando la cuenca ha estado sujeta a cambios de importancia por ejemplo, la urbanización o el desarrollo de actividades económicas el reflejo será evidente en los regímenes de escurrimientos, de tal forma que la información adecuada en una sección de interés sobre una corriente es necesaria para diseñar obras de aprovechamiento o de protección (Ma, 2004)

De acuerdo a Bhaduri *et al.* (1997), la expansión significativa de las áreas urbanas impacta al medio ambiente, incrementando el volumen de los escurrimientos en las superficies. Por su parte Jae *et al.* (2001) señalan que la conversión de áreas rurales a usos urbanos ha incrementado notablemente los escurrimientos. Zhan y Huang (2004) indican que los mayores escurrimientos se presentan en las zonas urbanas, debido a la impermeabilidad que éstas presentan. Los estudios de Ramsey *et al.* (1999), mencionan que las actividades humanas y los cambios de las condiciones

vegetales han impactado en los recursos naturales principalmente en los procesos hidrológicos. Sin embargo, Symeonakis (2004) afirma que los incrementos de los escurrimientos en la zona del mediterráneo son a causa del crecimiento de la agricultura y de las actividades turísticas, concluyendo que las actividades turísticas son unas de las principales causas de compactación del suelo lo que provoca la reducción de infiltración y por tanto el incremento de los escurrimientos.

Generalidades de percepción remota y sistemas de información geográfica (SIG)

La información precisa en las coberturas terrestres y en el medio ambiente son componentes críticos para el cálculo de escorrentías y para la planeación del ecosistema. Los avances en los conocimientos científicos y las nuevas técnicas de percepción remota permiten un mejor entendimiento de los procesos hidrológicos y ayudan a mejorar los métodos para el análisis de las escorrentías debido a la facilidad de poner en una imagen grandes extensiones de terreno con la resolución necesaria para el manejo de la información (Bhaduri *et al.*, 2000; Melesse, 2003).

La percepción remota es una técnica que permite adquirir imágenes de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas espaciales. De esta forma se asume que entre la Tierra y el sensor existe una interacción energética, ya sea por reflexión de la energía solar o de un haz energético artificial, o por emisión propia. La percepción remota permite una rápida y efectiva aplicación a la solución de problemas de manejo y planificación territorial, evaluación de condiciones naturales e impacto ambiental (Candean, 1994).

Aunque la percepción remota no puede ser usada directamente para cuantificar los escurrimientos, si puede ser utilizada como herramienta para determinar la forma y los parámetros del uso del terreno de una cuenca. De esta manera los datos de sensores remotos junto con los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y otros datos espaciales nos permiten obtener

mapas temáticos sobre tipos de suelo, usos de terreno y características hidrológicas necesarios para el cálculo del volumen de escorrentía.

Los SIG son sistemas computarizados que consisten en un conjunto de herramientas diseñado para la captura, el almacenamiento y análisis de información acerca de atributos en donde la localización y relaciones espaciales juegan un papel principal (Palacio, 1992).

Un SIG incluye diversas funciones de análisis que permiten manipular variables utilizadas en los procesos de estimación de parámetros hidrológicos. Básicamente, el empleo adecuado de dichas funciones hace posible la implementación de mecanismos efectivos para la estimación de parámetros de uso frecuente en la clasificación de cuencas hidrológicas (Treviño *et al.*, 2002).

Estos avances tecnológicos han permitido un mejor estudio de los recursos naturales y del medio al integrar y analizar gran cantidad de información de naturaleza espacial y no espacial. De esta forma, la percepción remota y su complementación con los SIG ha tenido excelentes resultados en el manejo de las cuencas (Barale, 1996). Por ejemplo, Mendoza, analizó el aumento de escurrimientos en la cuenca del Lago de Cuitzeo, Michoacán, causadas por el cambio de la cobertura vegetal y uso del terreno a través de técnicas de percepción remota y SIG, encontrando un incremento en los valores de escorrentía como resultado de un crecimiento de la superficie ocupada por asentamientos humanos.

Método del Número de Curva y modelo L-THIA

En 1986 la Soil Conservation Service (SCS) ahora llamada Natural Resource Conservation Service (NRCS) de los Estados Unidos, desarrolló un método para estimar el volumen directo de las escorrentías. Este método es referido como el Número de Curva (Melesse, 2004), el cual es un parámetro hidrológico usado para describir el escurrimiento potencial en una área determinada en función al uso del terreno, a los grupos hidrológicos del suelo y los antecedentes de humedad. Los

valores del Número de Curva caen en un intervalo de 0 a 100, un valor grande indica poca infiltración que se da principalmente en áreas urbanas. El de Número de Curva es un método común para predecir el volumen de escurrimientos.

Un modelo elaborado a partir del Método de Número de Curva es el de Evaluación del Impacto Hidrológico a Largo Plazo (L-THIA, por sus siglas en inglés) el cuál fue desarrollado por la Universidad de Purdue (1994). Este modelo fue ligado al programa ArcView para analizar con eficacia las características espaciales y temporales de los escurrimientos, así como para caracterizar a los usos del terreno como fuentes no puntuales de contaminación y estimar la concentración de contaminantes en los escurrimientos. La base del modelo L-THIA, es el cómputo de los escurrimientos diarios obtenidos de los datos del suelo y usos del terreno en formato vectorial para calcular sus atributos, complementados con los registros climáticos y con los valores del Número de Curva. Muchos investigadores han utilizado datos satelitales para estimar los escurrimientos a través del modelo L-THIA.

Bhaduri *et al.* (2000) aplicó el modelo L-THIA en la cuenca Little Tagle Creek (LEC) en Indianápolis, Estados Unidos, para analizar los impactos en el volumen de escurrimientos considerando los cambios temporales del uso terreno y la alteración de los grupos hidrológicos de suelos por compactación. Los resultados encontrados fueron de un incremento del 18% en áreas urbanas de 1973 a 1991, lo que propició el aumento del 80% del volumen escurrido anualmente.

Kim *et al.* (2002), realizaron una comparación sobre los efectos históricos de los cambios del uso del terreno en los volúmenes de escurrimientos en Indian River Lagoon Basin (IRLB), Florida utilizando el modelo L-THIA para los años 1920, 1943 y 1990. El sistema L-THIA fue usado para calcular la profundidad de escurrimientos de acuerdo a los mapas de uso del terreno y a los grupos hidrológicos del suelo. Los datos obtenidos indican que el volumen aumento un 26% de 1920 a 1943 y un 69% de 1943 a 1990, esto propiciado por el incremento del área urbana.

En la cuenca Wildcat Creek Watershed, Pandey *et al.* (2000) estimaron el volumen total de dicha cuenca para los años 1992 y 1997. Los valores que resultaron indican que hubo un incremento de 450,000 m³ a casi 900,000 m³, predominando la agricultura con un 63% de aumento de 1992 a 1997.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La cuenca Lechuguilla-Ohuira-Navachiste se localiza en la región hidrológica No 10, Sinaloa al noroeste del Estado de Sinaloa, entre las coordenadas $25^{\circ}45'$ y $26^{\circ}12'$ de latitud norte y los $108^{\circ}28'$ y $109^{\circ}21'$ de longitud oeste, frente a las costas del Golfo de California, México (Figura 1). Cuenta con una superficie de 4,038.37 km² aproximadamente. La cuenca posee una forma triangular con poca pendiente, se encuentra limitada al norte-noroeste por la cuenca del Río Fuerte, hacia el este por la cuenca del Río Sinaloa y por la porción suroeste el Golfo de California.

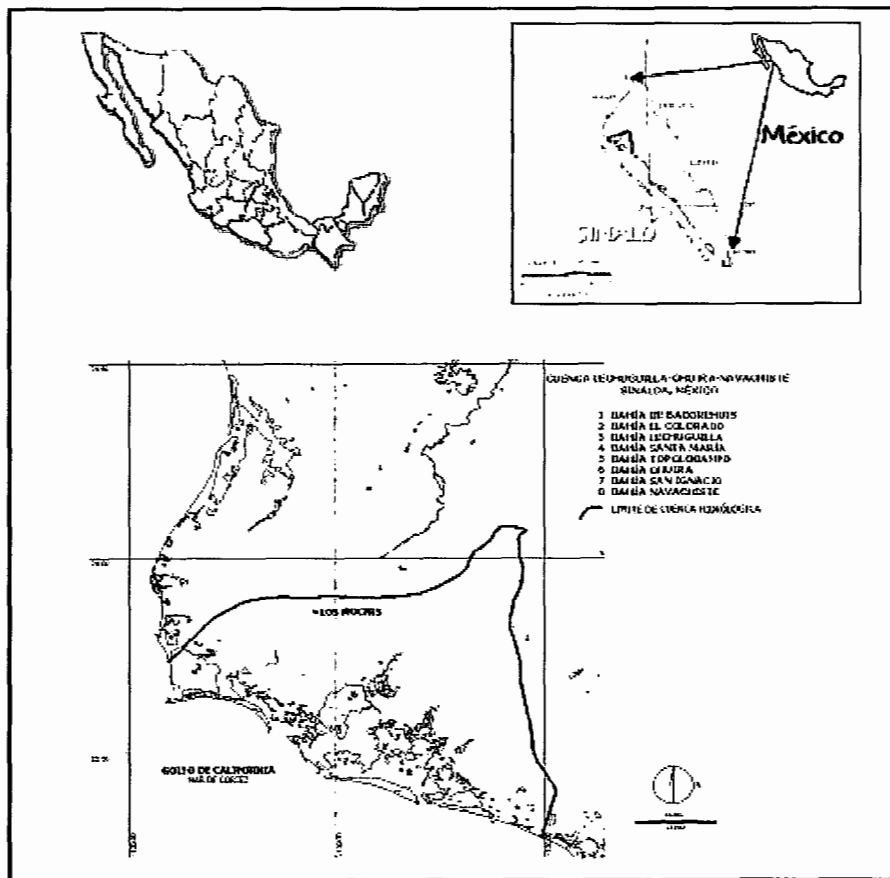


Figura 1. Área de estudio: cuenca Lechuguilla-Ohuira-Navachiste, Sinaloa, México.

CUCBA



BIBLIOTECA CENTRAL

Clima. De acuerdo a la clasificación climática de Koppen la cuenca presenta un clima que va de BW (cálido muy seco) a BS (cálido seco). La temperatura media anual es de 25 °C, con una precipitación media anual de 330.1 mm.

Vegetación. Los principales tipos de vegetación que se encuentran en la región son el bosque tropical caducifolio, bosque espinoso, vegetación hidrófita y halófita y el matorral xerófito (INEGI, 2000 y 2003).

Uso del suelo. La cuenca se sitúa en una región caracterizada por actividades agrícolas altamente productivas y tecnificadas y, por presentar la mayor densidad de granjas camaronícolas del país. En gran parte de la cuenca se encuentran los distritos de riego 075 Río Fuerte y el 063 Guasave, en los municipios de Ahome y Guasave, respectivamente.

Actividades socioeconómicas. El municipio de Ahome se localiza al noroeste de Sinaloa entre las coordenadas 25° 27' y 26° 24' de latitud norte y los 108° 45' y 109° 26' de longitud oeste, cuenta con una superficie aproximada de 4,350 km² de los cuales el 50% se ubica dentro de la cuenca (INEGI, 1999). En el año 2000, Ahome contaba con una población total de 359,146 habitantes (INEGI, 2003). Por su parte Guasave, se localiza entre las coordenadas 25°11' y 25°53' de latitud norte y 108°10'00" y 109°06'50" de longitud oeste. Cuenta con una extensión territorial de 3,434.41 km², ubicándolo en el octavo lugar en tamaño con respecto al resto de los municipios. Guasave contaba con una población de 277,402 habitantes en el 2000 (INEGI, 2002). Más del 70% de los terrenos agrícolas presentes en los distritos agrícolas de ambos municipios cuenta con sistemas de riego y registra cosechas del 80% de la superficie cultivada, encontrando principalmente cultivos como trigo, soya, sorgo, maíz, algodón y hortalizas (INEGI, 2003). En cuanto a la acuicultura prácticamente en su totalidad está orientada a la camaronicultura. En el municipio de Ahome se han reportado 30 granjas con alrededor de 3000 ha en operación y en Guasave casi 60 granjas con 4500 ha en operación (Ruiz y Berlanga, 2003).

Métodos

Se analizaron los cambios de los volúmenes de escurrimientos en la cuenca Lechuguilla-Ohuira-Navachiste, Sinaloa, asociados al cambio en la cobertura y uso del terreno, a través del modelo del Número de Curva con una extensión para ArcView 3.2 (Harbor, 1998), utilizando datos de percepción remota, cartografía escala 1:250 000 y registros históricos de precipitación.

Mapas de coberturas del terreno

Para generar mapas de la cobertura y usos del terreno en la cuenca se clasificaron de manera independiente imágenes de satélite Landsat (path/row: 34/42 y 33/42) MSS (Multispectral Scanner) de 1973 y 1986, y ETM+ (Enhanced Thematic Mapper) del 2000 (Cuadro 1). Previo al proceso de clasificación, se editaron escenas multiespectrales del área de estudio utilizando el comando MOSAIC de IDRISI 32, que además de formar un mosaico de imágenes con base a sus propiedades geográficas, también balancea sus valores numéricos de brillantez (Eastman, 1999). Las escenas fueron corregidas geográficamente a la zona 12 norte del sistema Universal Transversal de Mercator (UTM), utilizando el Datum NAD27, dentro de las coordenadas UTM 653533, 762373, 2797705 y 2902345 con una resolución espacial de 60 m para la imágenes MSS y de 30 para la imagen ETM+.

Las escenas fueron clasificadas de manera supervisada con el algoritmo de máxima verosimilitud, que se basa en la probabilidad de que un píxel pertenezca a una clase determinada, tomando como herramienta los datos de varianza-covarianza y la media de las firmas espectrales. La clasificación supervisada se puede definir como el proceso de usar muestras de identidades conocidas para clasificar píxeles de identidades desconocidas. Las muestras de las identidades conocidas son esos píxeles situados dentro de los campos de entrenamiento (Campbell, 1996). Las clases utilizadas

fueron 1) Lagunas y esteros, 2) Marismas, 3) Manglar, 4) Selva, 5) Vegetación secundaria, 6) Agricultura y 7) Suelos agrícolas (Cuadro 2).

El proceso de clasificación supervisada comenzó con la digitalización de los campos de entrenamiento sobre imágenes en falso color y la extracción de la firma espectral de cada una de las clases. Los campos de entrenamiento son muestras de píxeles de información del terreno, definidas con base al conocimiento previo de los diferentes usos de terreno y vegetación natural. La firma espectral es un patrón de reflectancia en cada banda del espectro electromagnético (Berlanga, 1999).

Cuadro 1. Sumario de las características de los sensores MSS, TM y ETM+ de los satélites Landsat, utilizadas en este estudio.

Banda	Sensor/Plataforma			
	resolución espacial	Mss/ Landsat 1-5	resolución espacial	ETM+ Landsat 7
1	80 m	Verde: 0.5-0.6 μm	30 m	Azul-Verde: 0.4-0.52 μm
2	80 m	Rojo: 0.6-0.7 μm	30 m	Verde: 0.52-0.6 μm
3	80 m	Infrarrojo cercano	30 m	Rojo: 0.63-0.69 μm
4	80 m	Infrarrojo cercano	30 m	Infrarrojo cercano: 0.76-0.90 μm
5			30 m	Infrarrojo medio: 1.55-1.75 μm
6a*			120 m	Infrarrojo lejano: 10.4-12.5 μm
6b*			60 m	Infrarrojo lejano: 10.4-12.5 μm
7			30 m	Infrarrojo medio: 2.08-2.35 μm
8			15 m	Pancromático: 0.52-0.90 μm

La amplitud de barrido de todos los sensores es de 184 km

Notas: en Landsat 4 y 5 las bandas MSS fueron reenumeradas pero la definición espectral se mantuvo igual. *Bandas espectrales no utilizadas en este estudio. Fuentes: Campbell (1986); NOAA (http://www.csc.noaa.gov/crs/rs_apps/sensors/landsat.htm).

A los mapas temáticos resultantes se les añadieron los polígonos de las clases 8) Poblados y 9) Granjas camaronícolas (Cuadro 2). La clase Poblados se digitalizó sobre compuestos en falso color y sobre las cartas topográficas escala 1:250 000, G-12-9 Los Mochis y G-12-6 Huatabampo editadas por INEGI en 1984 y 1999. Para la digitalización de las cartas se utilizó el programa Autocad 2004 y una tableta digitalizadora CalComp DrawingBoard III. Las granjas camaronícolas fueron digitalizadas en pantalla sobre el compuesto pancromático de Landsat ETM+ con una

resolución espacial de 15 m. Las Granjas camaronícolas solo aparecen en la clasificación del año 2000 ya que la primera granja de la región aparece en 1988.

Los vectores de Poblados y Granjas camaronícolas se transformaron a formato raster con los mismos parámetros espaciales de los mapas temáticos resultantes de la clasificación y se adicionaron para generar los mapas temáticos finales con nueve clases.

Cuadro 2. Coberturas y usos del terreno utilizados en la clasificación supervisada de imágenes Landsat y digitalización de datos auxiliares para producir mapas temáticos de la cuenca Lechuguilla-Ohuira-Navachiste, Sinaloa.

Cobertura	Descripción
1) Lagunas y esteros	En esta clase se agruparon los espejos de agua de las lagunas y esteros presentes dentro de los límites de la cuenca
2) Marismas	Terreno bajo y pantanoso que se inunda por las agua del mar durante las mareas altas, a menudo se crean en zonas de desembocaduras de ríos. Esta clase está integrada por suelos salinos, que puede presentar algunos manchones de vegetación adaptada al medio halofito.
3) Manglar	Tipo de vegetación característico de las orillas de esteros, desembocaduras de ríos y algunos otros habitats similares. Suelos periódicamente inundados por aguas salobres o salinas. <i>Rhizophora mangle</i> , es la especie predominante seguida por <i>Avicennia germinans</i> y <i>Laguncularia racemosa</i> .
4) Selva	Esta clase está integrada por las coberturas vegetales que pertenecen a la selva baja caducifolia, bosque espinoso y matorral xerófilo. La selva baja caducifolia se encuentra en suelos de ladera y con topografía muy accidentada. Son terrenos someros, arenosos o de textura arcillosa y pedregosa, con un drenaje superficial fuerte. Domina las especies arbóreas no espinosas de 8 a 15 m de altura y pierden sus hojas en la época de sequía. El bosque espinoso en la costa se encuentra en zonas planas con suelos profundos. Se caracteriza por tener dominancia de elementos arborescentes espinosos con alturas menores a los 15 m. El matorral xerófilo cubre grandes extensiones de la costa, donde el clima es muy caluroso.
5) Vegetación secundaria	Vegetación de segunda generación o en proceso de sucesión.
6) Agricultura	Corresponde a los suelos utilizados para el cultivo de diferentes variedades vegetales con o sin cultivo en pie. En las últimas décadas la agricultura ha sufrido grandes cambios para responder a la demanda de la población. Los cultivos más importantes en el área son; tomate, maíz, caña de azúcar y frijol.
7) Suelos agrícolas	Suelos que no presentan cultivo en pie, pero que son utilizados con fines agrícolas. Pueden encontrarse sin vegetación o con pastizales muy pequeños.
8) Poblados	Áreas urbanas o zonas pobladas
9) Granjas camaronícolas	Granjas cuya actividad es el cultivo de camarón

Evaluación de la exactitud de la clasificación

La exactitud de la clasificación del 2000 se evaluó con una matriz de error y se estimó el error de comisión y omisión, la exactitud del productor, del usuario y total, y el coeficiente de Kappa. La

matriz de error es un arreglo que expresa el número de unidades de muestra asignados a una clase particular en una clasificación con relación al número de unidades de muestras asignadas a la misma categoría, pero en otra clasificación que es considerada como correcta (datos de referencia o prueba).

Las columnas usualmente representan los datos de referencia, en tanto que los renglones indican la clasificación generada de datos de percepción remota (Richards y Jia, 1999) Esta matriz es una forma de representar la exactitud de un mapa en el sentido de que la exactitud de cada categoría está descrita por medio de los errores de comisión y omisión. El error de comisión sucede cuando se incluye un área dentro de una clase que no pertenece, en tanto que el error de omisión se presenta cuando se excluye un área de una clase cuando en realidad pertenece a ella.

La exactitud del productor y del usuario son medidas individuales para cada categoría de la clasificación, la exactitud del productor resulta de dividir las unidades correctamente clasificadas en una categoría dada, entre el número de unidades de muestra para esa categoría dentro de los datos de referencia (sumatoria de la columna de la categoría); en tanto que la exactitud del usuario se obtiene dividiendo las unidades correctamente clasificadas entre el número de unidades en la clasificación generada con datos de percepción remota (sumatoria del renglón de la categoría).

El coeficiente de Kappa (K) es una técnica discreta multivariada que determina estadísticamente si una matriz de error es significativamente diferente de otra. El coeficiente es una medida de la agregación o exactitud basada en las diferencias entre los datos de la clasificación y de referencia, y la exactitud de una clasificación debida al azar (Congalton y Green, 1999; Richard y Jia, 1999).

Si N es el número total de unidades de muestreo (puntos o campos de prueba) de la matriz de error y si x_{ij} es el valor de la clase i en el renglón j y representan unidades de muestreo

correctamente clasificadas, $n_{i+} = \sum_k x_{ik}$ (sumatoria de todos los valores de las columnas en el renglón i) y $n_{+j} = \sum_i x_{kj}$ (sumatoria de todos los valores de los renglones en la columna j), entonces:

$$\text{exactitud del productor} = n_{jj} / n_{+j}$$

$$\text{exactitud del usuario} = n_{ii} / n_{i+}$$

$$\text{exactitud total} = \sum_i x_{ii} / N$$

y el estimador del coeficiente de Kappa (K') es definido por:

$$K' = \frac{N \sum_i n_{ii} - \sum_i n_{i+} n_{+j}}{N^2 \sum_i n_{i+} n_{+j}}$$

K' toma valores en el intervalo de 0 a 1, valores significativamente diferentes de cero indican un proceso de clasificación mejor a una clasificación debida al azar (Mas, 1997). Suponiendo una distribución normal para K , el valor que tome su estimador puede ser interpretado con una prueba de hipótesis con un estadístico Z , donde $H_0: K = 0$ y $H_1: K \geq 0$ (Congalton y Green, 1999).

Los datos de referencia para construir la matriz de error se obtuvieron de muestreos de campo asistidos con un sistema de posicionamiento global marca Magullan modelo SporTrak con resolución +/- 4, tomando al azar 232 puntos de verificación.

El procesamiento digital de las imágenes se llevó acabo con los programas de MultiSpec para Windows 2.7 de la Universidad de Purdue, Indiana, E.U.A (Landgrebe & Biehl, 1995) e IDRISI 32 de la Universidad de Clark, E.U.A (Eastman, 1995).

Análisis de las tendencias de cambios

Los cambios de cobertura y uso del terreno se detectaron por un análisis multitemporal postclasificadorio. Previo al análisis, el mapa temático del 2000 con resolución de 30 m se sometió

a un proceso de corrección geométrica para ajustarlo a los parámetros espaciales de los mapas temáticos de los años anteriores con resolución de 60 m, utilizando una función de mapeo cuadrática y un algoritmo de remuestreo del vecino más cercano (Eastman, 1995).

Los mapas temáticos de cada fecha fueron sobrepuestos para generar una matriz de detección de cambio la cual permite calcular la conjunción lógica de todas las combinaciones posibles de las clases representadas en dos mapas. En un arreglo similar a la matriz de error, pero comparando mapas de diferentes fechas, la diagonal superior de la matriz representa píxeles de la misma clase en ambas fechas, es decir píxeles sin cambio (Dobson *et al.*, 1995; Eastman *et al.* 1995). De la matriz de detección de cambio se pueden calcular el porcentaje del área de estudio sin cambio (equivalente a la exactitud total) y un estimador del coeficiente de Kappa, pero en este caso toma valores en el intervalo de -1.0 a 1.0. Valores cercanos a -1.0 implican un cambio total, valores cercanos a cero denotan cambios próximos al 50% y valores cercanos a 1.0 indican que no hubo cambio (Eastman *et al.* 1995).

Análisis de los Impactos del cambio de cobertura y usos del terreno sobre los patrones de escurrimiento de la cuenca Lechuguilla-Ohuira-Navachiste (modelo del número de curva)

El número de curva es un conjunto empírico de relaciones cuyos valores caen en el intervalo de 25 a 100, representando las condiciones de la superficie terrestre en función del uso del terreno, la permeabilidad del suelo y los antecedentes de humedad (USDA, 1986). Este a su vez proporciona una forma para estimar la cantidad de agua de lluvia que escurriría en un periodo de 24 horas a partir de datos de la precipitación y condiciones del sitio. Las propiedades hidrológicas del suelo y el uso del terreno se combinan para calcular el número de curva para un sitio que es usado para predecir la profundidad de escurrimiento para una profundidad de lluvia dada.

$$Q = (P - I_a)^2 / ((P - I_a) + S)$$

Donde Q es escurrimiento, P la precipitación, S el potencial máximo de retención e I_a = abstracción inicial.

$$I_a = 0.2S$$

$$Q = (P - 0.2S)^2 / (P + 0.8S)$$

$$S = (1000 / CN) - 10$$

Donde CN es el número de curva.

El modelo del número de curva trabaja con cuatro grupos hidrológicos de suelo (Cuadro 3) y de cuatro a ocho coberturas del terreno (Halley, 2004). A partir de la digitalización de las cartas edafológicas escala 1:250,000 G12-9 Los Mochis y G12-6 Huatabampo (INEGI, 1984) se generó un mapa temático de tipos de suelo de la cuenca de acuerdo a la clasificación de FAO y se reclasificaron al grupo hidrológico de suelo correspondiente. El mapa resultante junto con los mapas temáticos de cobertura y usos del terreno de la cuenca Lechuguilla-Ohuira-Navachiste de 1973, 1986 y 2000 se exportaron al programa Arcview 3.1 para generar de manera automática los mapas del número de curva de cada año con base a la combinación cobertura-uso del terreno/grupo hidrológico del suelo, aplicando la extensión L-THIA (Long-Term Hydrologic Impact Assessment) desarrollada por Engel *et al.*, (2005).

Con registros históricos (1962-2002) de la precipitación diaria registrada en estaciones meteorológicas dentro de la cuenca: Ahome, Corepe, Juan José Ríos, Topolobampo y Los Mochis, proporcionados por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN), se estimó la precipitación total anual promedio de 1973, 1986 y el 2000 considerando 10 años de antecedentes de lluvia. Cada uno de estos promedios se utilizó como la profundidad de precipitación (P) que junto con los mapas del número de curva permitieron estimar la profundidad (Q) y el volumen de escurrimiento total anual de la cuenca para cada año analizado, también con el uso de la extensión

L-THIA. Adicionalmente se estimó el volumen de precipitación y el porcentaje de lluvia escurrida:

$$V_e = \sum_i Q_i A_i$$

para toda i combinación cobertura-uso del terreno/grupo hidrológico del suelo

$$V_p = P A_t$$

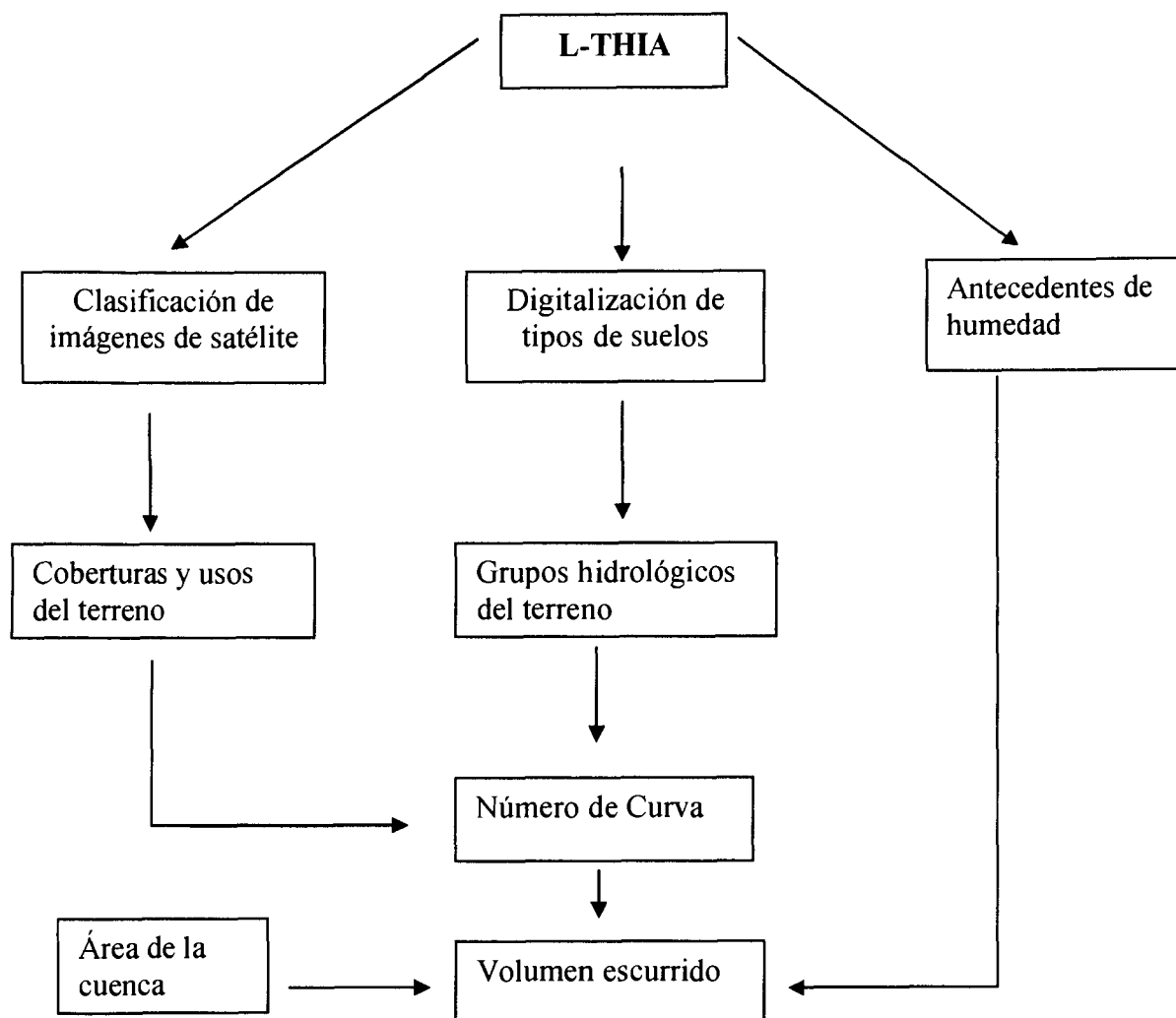
$$\%_{\text{lluvia}} = \left[\frac{V_e}{V_p} \right] 100$$

Donde: V_e es el volumen de escurrimiento, Q_i es la profundidad de escurrimiento para la combinación cobertura-uso del terreno/grupo hidrológico del suelo i , A_i es el área de la combinación cobertura-uso del terreno/grupo hidrológico del suelo i , V_p es el volumen de precipitación, P es la profundidad de precipitación, A_t es el área total de la cuenca y $\%_{\text{lluvia}}$ es el porcentaje de lluvia escurrida.

Cuadro 3. Grupos hidrológicos de suelos propuesto por USDA (1986) para ser utilizados en el modelo del Número de Curva.

Grupos de Suelos Hidrológicos	Características del Grupo Hidrológico.
A	Arenas, tierras arenosas o tierras cubiertas de arena. Son suelos con bajo potencial de escurrimiento y alta infiltración. Profundos. Buenos para drenar.
B	Marga de cienos o margas. Capacidad de infiltración moderada cuando están completamente húmedos y consistentes, suelos de textura moderadamente fina a moderadamente gruesa, tales como los limos arenosos. Drenaje de moderado a bien drenados.
C	Margas de arenas arcillosas. Capacidad de infiltración lenta cuando están fuertemente húmedas y consisten principalmente de suelos con una capa que impide el movimiento del agua hacia abajo y suelos con estructura de fina a moderada finas.
D	Margas arcillosas, margas arcillosas encenegadas, arenas arcillosas o arenas arcillosas encenegadas. Suelos con alto potencial de escurrimiento. Con muy poca infiltración cuando están completamente húmedos y consisten principalmente de suelos arcillosos con alto potencial de expansión, suelos con una capa de agua superior y con una cubierta arcillosa cerca o en la superficie y suelos someros sobre material impermeable.

Esquema metodológico



RESULTADOS

Procesamiento digital de imágenes de satélite.

Los mapas temáticos de coberturas del terreno para cada año generados por la clasificación supervisada de las imágenes Landsat y la digitalización de datos auxiliares se muestran en la Figura 2, en tanto que las firmas espectrales utilizadas en los proyectos de clasificación se muestran en el Cuadro 4.

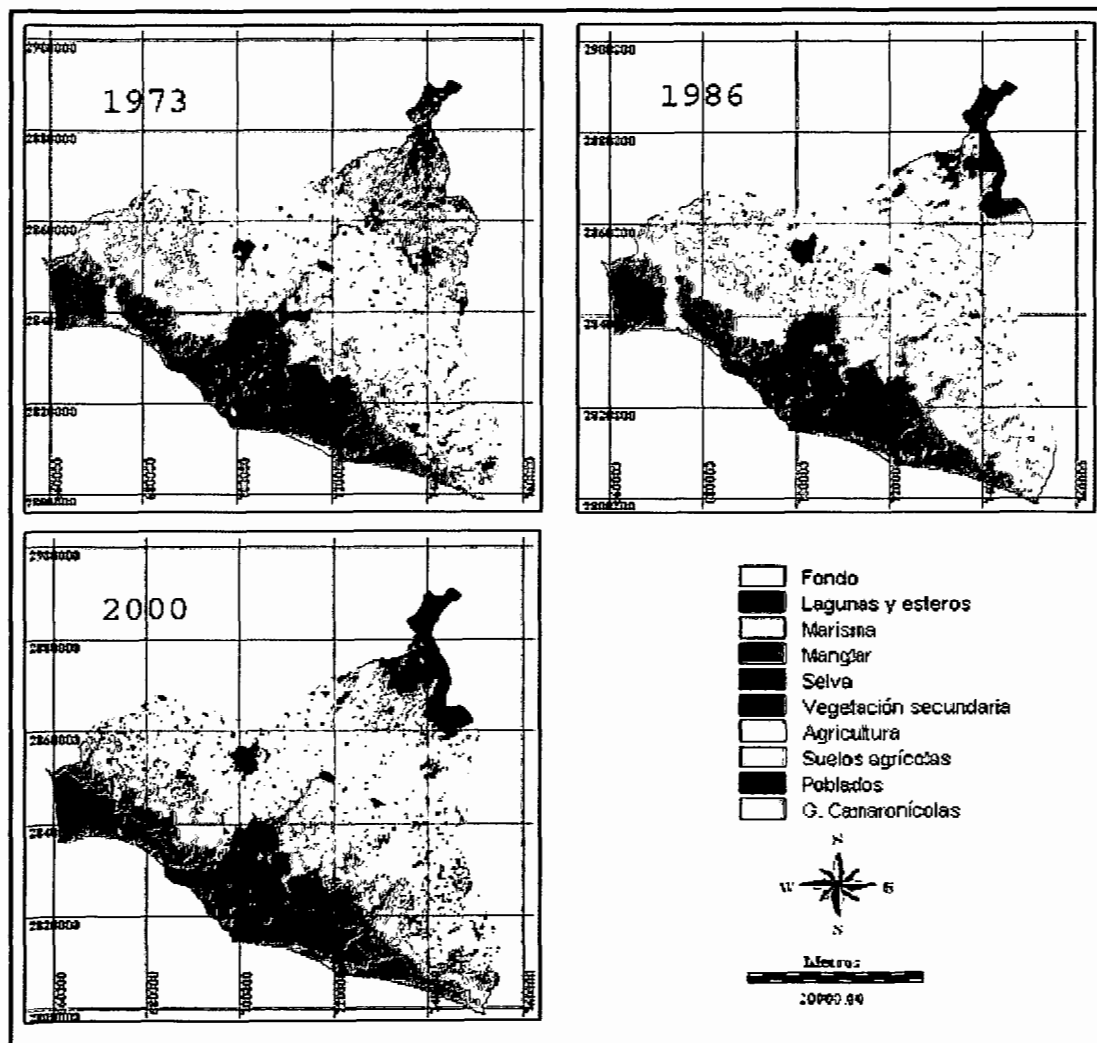


Figura 2. Mapas temáticos de las coberturas y usos del terreno en la cuenca Lechuguilla- Ohuira-Navachiste de los años 1973,1986 y 2000

Cuadro 4. Datos estadísticos de valores de brillantez para los diferentes campos de entrenamiento.

Clase	Años	No subclases	Brillantez (ND)					
			1	2	3	4	5	7
Lagunas y esteros	1973	3	31.7	23.2	13.3	6.1		
	1986	4	19.7	16.6	7.9	2.5		
	2000	2	69.1	49.5	37.7	18.0	10.8	9.8
Manglar	1973	3	25.7	17.8	37.0	42.2		
	1986	3	17.1	13.3	39.1	44.0		
	2000	2	64.1	44.9	36.4	87.8	36.3	21.4
Marismas	1973	3	49.8	57.0	54.6	48.8		
	1986	3	44.9	59.7	59.3	49.4		
	2000	5	94.6	80.7	97.6	83.9	99.3	86.6
Agricultura	1973	6	31.4	27.5	42.9	46.4		
	1986	6	22.1	23.1	48.6	50.9		
	2000	8	71.9	57.0	56.3	111.9	72.7	48.2
Selva	1973	2	27.0	22.2	27.2	28.4		
	1986	3	16.6	16.1	27.0	29.7		
	2000	3	67.4	49.7	54.4	68.1	81.1	55.5
Suelos agrícolas	1973	3	32.8	32.7	34.2	33.3		
	1986	2	31.8	42.9	49.2	45.9		
	2000	2	89.1	78.5	104.2	92.8	113.1	94.9
Vegetación secundaria	1973	2	29.5	25.4	33.4	35.4		
	1986	2	22.3	23.5	40.4	42.5		
	2000	4	76.3	63.4	75.1	103.1	103.3	74.8

El mapa temático del 2000 se produjo con una exactitud del 89% para un total de 232 puntos de verificación y un estimador del coeficiente de Kappa (K') de 0.88. Las clases Esteros y lagunas, Poblados y Granjas camaronícolas tuvieron una exactitud del productor y del usuario del 100% (Cuadro 5). Por el contrario, la vegetación secundaria fue la cobertura que se clasificó tanto con menor exactitud del productor como del usuario. De 30 puntos de prueba clasificados como esta clase, 33% en realidad pertenecían a otra (error de comisión) y otro 33% que en realidad pertenecían a la clase, fueron clasificados en otra categoría (error de omisión).

Tendencias de cambios

De 1973 a 1986 el porcentaje de cambio a nivel de paisaje fue de 32% y el coeficiente de Kappa estimado fue de 0.59 (Cuadro 6). La clase dominante tanto para 1973 como para 1986 fue Agricultura con un 38% y 35% respectivamente, lo cual mostró una ligera tendencia negativa

disminuyendo casi el 4%. Por otro lado, la clase Selva fue la de mayor pérdida de área siendo desplazada principalmente por los Suelos agrícolas. Para el caso de las Granjas camaronícolas no existen datos en las clasificaciones de 1973 y 1986.

De 1986 al 2000 el cambio a nivel de paisaje fue ligeramente menor que el periodo anterior, el porcentaje de cambio fue de 27% y el estimador del coeficiente de Kappa de 0.65 (Cuadro 7). En el 2000 la Agricultura cubrió casi el 45% de la cuenca y a diferencia de lo ocurrido en el periodo anterior, mostró una tendencia positiva con un incremento del 10%.

Cuadro 5. Matriz de error utilizada para evaluar la exactitud global de la clasificación supervisada para el año 2000

		Datos de referencia								Total
		1	2	3	4	5	6	8	9	
Datos clasificación	1. Lagunas	30	0	0	0	0	0	0	0	30
	2. Marismas	0	21	1	0	3	0	0	0	25
	3. Manglar	0	0	27	1	0	0	0	0	28
	4. Selva	0	0	0	22	2	0	0	0	24
	5. Vegetación secundaria	0	3	2	1	20	4	0	0	30
	6. Agricultura	0	0	0	3	5	27	0	0	35
	8. Poblados	0	0	0	0	0	0	30	0	30
	9. Granjas	0	0	0	0	0	0	0	30	30
	Total	30	24	30	27	30	31	30	30	232
Exactitud productor		100	87.5	90	81.5	66.7	87.1	100	100	
Exactitud usuario		100	84	96.4	91.7	66.7	77.1	100	100	

Cuadro 6. Matriz de detección de cambio de 1973 a 1986 en hectáreas.

		1973									Tot 86	%
		1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1986	1	61500	667	647	267	51	921	1	0	0	64055	14.12
	2	3327	49514	1817	4385	1622	18055	328	69	0	79118	17.45
	3	724	1010	18507	1503	458	410	9	0	0	22622	4.99
	4	576	894	582	30541	981	361	7958	0	0	41893	9.24
	5	102	3171	294	2371	4908	13982	2164	40	0	27031	5.96
	6	34	7660	4	6465	12522	118483	11509	78	0	156756	34.56
	7	13	3720	51	9762	2649	19527	21048	19	0	56790	12.52
	8	69	57	15	22	186	1567	66	3276	0	5259	1.16
	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
Tot 73		66344	66693	21918	55317	23377	173308	43084	3484	0	453524	
%		14.63	14.71	4.83	12.20	5.15	38.21	9.50	0.77	0.00		

Porcentaje de cambio = 32.13 %. Estimador del coeficiente de Kappa (K') = 0.59

Notas: 1 Lagunas y esteros, 2 Marismas, 3 Manglar, 4 Selva, 5 Vegetación secundaria, 6 Agricultura, 7 Suelos agrícolas, 8 Poblados, 9 Granjas camaronícolas

De 1986 al 2000 el cambio a nivel de paisaje fue ligeramente menor que el periodo anterior, el porcentaje de cambio fue de 27% y el estimador del coeficiente de Kappa de 0.65 (Cuadro 7). En el 2000 la Agricultura cubrió casi el 45% de la cuenca y a diferencia de lo ocurrido en el periodo anterior, mostró una tendencia positiva con un incremento del 10%.

Cuadro 7. Matriz de detección de cambio de 1986 al 2000 en hectáreas.

		1986									Tot 00	%
		1	2	3	4	5	6	7	8	9		
2000	1	61591	1098	715	289	102	5	21	6	0	63827	14.07
	2	1102	53022	1249	704	1665	665	663	108	0	59176	13.05
	3	552	2952	20399	213	314	104	69	0	0	24602	5.42
	4	402	804	63	35502	195	1260	3311	63	0	41601	9.17
	5	158	6433	152	4188	7103	13911	8338	178	0	40462	8.92
	6	244	10762	17	510	17253	139733	34494	632	0	203646	44.90
	7	0	0	0	486	6	63	9494	75	0	10124	2.23
	8	0	239	0	1	296	1015	310	4181	0	6042	1.33
	9	6	3809	26	0	97	0	90	16	0	4045	0.89
	Tot 73		64055	79118	22622	41893	27031	156756	56790	5259	1	453525
%		14.12	17.45	4.99	9.24	5.96	34.56	12.52	1.16	0.00		

Porcentaje de cambio = 27 %. Estimador del coeficiente de Kappa (K^2) = 0.65

Notas: 1 Lagunas y esteros, 2 Marismas, 3 Manglar, 4 Selva, 5 Vegetación secundaria, 6 Agricultura, 7 Suelos agrícolas, 8 Poblados, 9 Granjas camaronícolas

Cuadro 8. Matriz de detección de cambio de 1973 al 2000 en hectáreas.

		1973									Tot 00	%
		1	2	3	4	5	6	7	8	9		
2000	1	61404	543	1131	289	50	390	20	0	0	63827	14.07
	2	3084	40415	1669	2553	1475	9818	119	42	0	59176	13.05
	3	891	2123	18255	1715	567	1034	15	1	0	24602	5.42
	4	668	264	313	29133	753	1242	9226	1	0	41601	9.17
	5	191	6024	503	7141	4940	17011	4584	68	0	40462	8.92
	6	104	15474	5	11434	14936	138910	22526	257	0	203646	44.90
	7	0	0	0	2944	212	444	6458	67	0	10124	2.23
	8	0	279	24	1	311	2278	114	3034	0	6042	1.33
	9	1	1571	18	107	133	2181	22	12	1	4045	0.89
	Tot 73		66344	66693	21918	55317	23377	173308	43084	3484	1	453525
%		14.63	14.71	4.83	12.20	5.15	38.21	9.50	0.77	0.00		

Porcentaje de cambio = 33.3%. Estimador de Coeficiente de Kappa (K^2) = 0.57

Notas: 1 Lagunas y esteros, 2 Marismas, 3 Manglar, 4 Selva, 5 Vegetación secundaria, 6 Agricultura, 7 Suelos agrícolas, 8 Poblados, 9 Granjas camaronícolas

En la comparación de los años 1973 y 2000 el porcentaje de cambio a nivel de paisaje fue de 33% y el estimador del coeficiente de 0.57 (Cuadro 8). La Agricultura ha sido la clase que mayor cambio ha presentado en el período analizado. Por otra parte, en este análisis se puede apreciar el incremento de las clases Poblados mostraron un incremento del 14% con respecto a su cobertura inicial, sin dejar por ello de cubrir tan solo un pequeño porcentaje del paisaje.

Tanto de 1973 a 1986 como de 1986 al 2000 la clase Manglar mostró una ligera tendencia positiva. Por su parte las Marismas mostraron una tendencia negativa de 1986 al 2000, siendo desplazadas principalmente por las Granjas camaronícolas. De las poco más de 4000 hectáreas de estanquería que se estimaron en el 2000, el 94% eran Marismas en 1986.

Determinación de los Impactos sobre los patrones de escurrimiento

Los mapas temáticos fueron agrupados a coberturas con las que opera el Número de Curva, resultando en mapas temáticos con cuatro coberturas: Agua/humedales, Forestal, Agrícola y Residencial esta última subdividida en baja densidad y alta densidad para estimar el Número de Curva (Figura 3). Se identificaron siete tipos diferentes de suelos de acuerdo a la clasificación de la FAO-UNESCO (Cuadro 9 y Figura 4), de los cuales el Vertisol cubrió casi la mitad de la cuenca con 176,744 hectáreas, seguido por el Solonchak con 103,263 hectáreas, en tanto que el resto de los suelos cubrió poco menos del 31 % del área total.

Agrupando los tipos de suelo de la clasificación de la FAO/UNESCO, los cuatro grupos hidrológicos de suelos estuvieron representados dentro de la cuenca (Cuadro 10, Figura 5), encontrándose una marcada dominancia de suelos con baja tasa de infiltración, C y D, que en conjunto cubren el 86% de la cuenca.

La combinación grupo hidrológico/uso del terreno (Figura 6) con mayor extensión fue Agrícola/D, cubriendo más del 37% de la cuenca, seguida de la combinación Humedales/C que

cubrió cerca del 20% tanto para 1973 como para 1986 y 2000. Los Números de Curva asignados para las posibles combinaciones, uso del terreno/grupo hidrológico de suelo presente en el área de estudio se muestran en el Cuadro 11, encontrándose valores de 30 a 100 para la cuenca Lechuguilla-Ohuira-Navachiste.

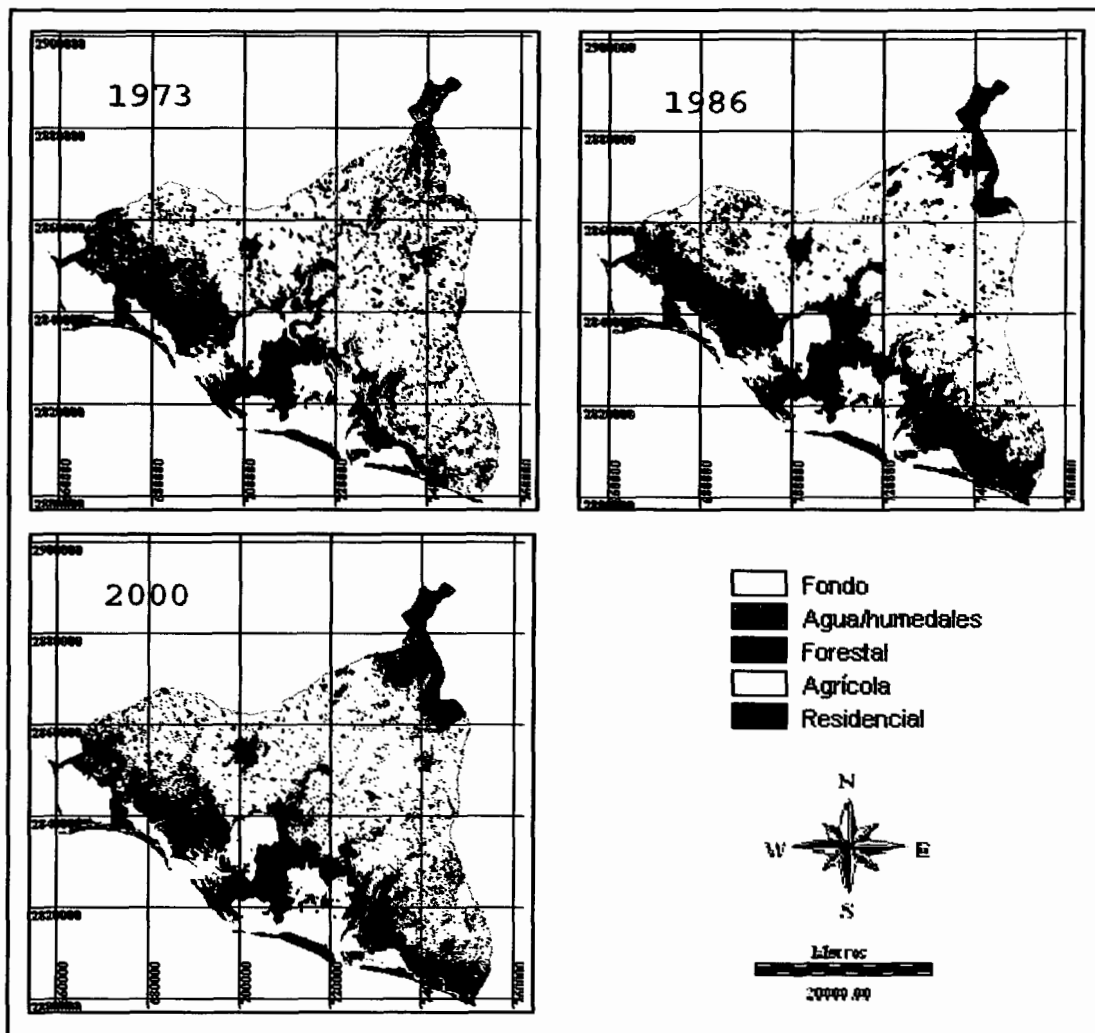


Figura 3. Mapa temático de coberturas y usos del terreno en la cuenca Lechuguilla-Ohuira-Navachiste con base a el modelo del Número de Curva

El potencial máximo de retención (S) fue mayor para la combinación Forestal/A de 23.3 (Cuadro 12), debido a que presentó un Número de Curva más bajo de todos (30). La condición

para obtener un Número de Curva de 100 y un valor S de 0 estuvo asociada a la cobertura Agua/humedales (marismas, manglar y granjas camaronícolas) para los 4 diferentes grupos hidrológicos de suelo, indicando una capacidad nula para retener el agua de lluvia. El promedio de S para la cuenca se estimó en 3.9 y la desviación estándar de 5.6.

Cuadro 9. Suelos presentes en el área de estudio con base a la clasificación FAO/UNESCO

Suelos FAO/UNESCO	Características
Vertisol	Es un suelo arcilloso, difícil de trabajar y poco permeable; sin embargo presenta buenos niveles de fertilidad pero presentan problemas para su manejo debido a su dureza, y con frecuencia ocasionan problemas de inundación y drenaje. Frecuentemente son de coloración negra o grises, pegajosos cuando están húmedos y muy duros cuando están secos. Son suelos que se localizan en climas templados y cálidos, en zonas en las que hay una marcada estación seca y otra lluviosa.
Litosol	Son suelos que cuentan con una capa muy delgada de materia orgánica menor a los 10 centímetros., además de que es un suelo pedregoso con topografía accidentada y muy susceptible a la erosión.
Regosol	Se caracteriza por presentar capas distintas, es decir, presentan un solo horizonte. Estos suelos en el municipio son claros y arenosos, con bajo contenido de materia orgánica y un drenaje interno excesivo, se le localiza a lo largo del litoral de playas, dunas y pequeñas penínsulas o barras. Esta unidad edáfica sustenta una vegetación de matorral.
Solonchak	Se caracteriza por presentar un alto contenido de sales en alguna parte del suelo o en todo el perfil, su vegetación cuando la hay, es de pastizales o algunas plantas que toleran el exceso de sal y manglares ya que su ubicación es cercana al mar. Poca susceptibilidad a la erosión
Xerosol	Se caracterizan por tener una capa superficial delgada de tono claro y muy pobre en humus, textura de migajón arcillosa o arcillosa, de color amarillento o rojizo; se derivan de rocas arcillosas y calcáreas y su estructura es en forma de bloques. Muchas veces presentan manchas, polvo o aglomeraciones de cal a cierta profundidad, así como cristales de yeso o caliche. Ocasionalmente son salinos. La explotación del matorral se lleva a cabo en estos suelos en especies como la candelilla. Los xerosoles tienen baja susceptibilidad a la erosión, excepto cuando están en pendientes o sobre caliche.
Feozem	Su principal distintivo es una capa superficial obscura, suave, rica en materia orgánica y nutrientes, de clase textural media y gran capacidad para almacenar agua. Son suelos abundantes en nuestro país, y los usos de que son objeto son variados, en función del clima, relieve y algunas condiciones del suelo. Muchos feozem son profundos y están situados en terrenos planos, que se utilizan para agricultura de riego o de temporal, con altos rendimientos. Los menos profundos, o los que se presentan en laderas y pendientes, tienen rendimientos más bajos y se erosionan con mucha facilidad. Se pueden utilizar para ganadería
Castañozem	Son suelos profundos, bien drenados, de color pardo rojizo oscuro, muy ricos en materia orgánica y nutrimentos, se presentan en zonas planas, es posible cultivar cualquier tipo de gramíneas obteniendo altos rendimientos, son suelos muy estables y el único inconveniente que tienen es que cubren superficies muy pequeñas.

La precipitación media anual de los 10 años previos al año de estudio para las seis estaciones meteorológicas fue en 1973 de 335 mm, en 1986 de 407 mm y 229 mm en el 2000. La

media ponderada del potencial máximo de retención (S) en 1973 fue de 2.53, en 1986 de 2.40 y 2.58 en el 2000, en tanto que la profundidad de escurrimiento (Q) promedio en 1973 fue de 0.16, de 0.07 en 1986 y 0.09 en el 2000. Los volúmenes de escurrimiento estimados fueron de 1.058 x10⁹ m³, 1.342 x10⁹ m³ y 6.780 x10⁹ m³, respectivamente (Cuadro 12), lo que equivale al 83%, 86% y 77% del total del volumen de lluvia escurrido para un promedio de 82%.

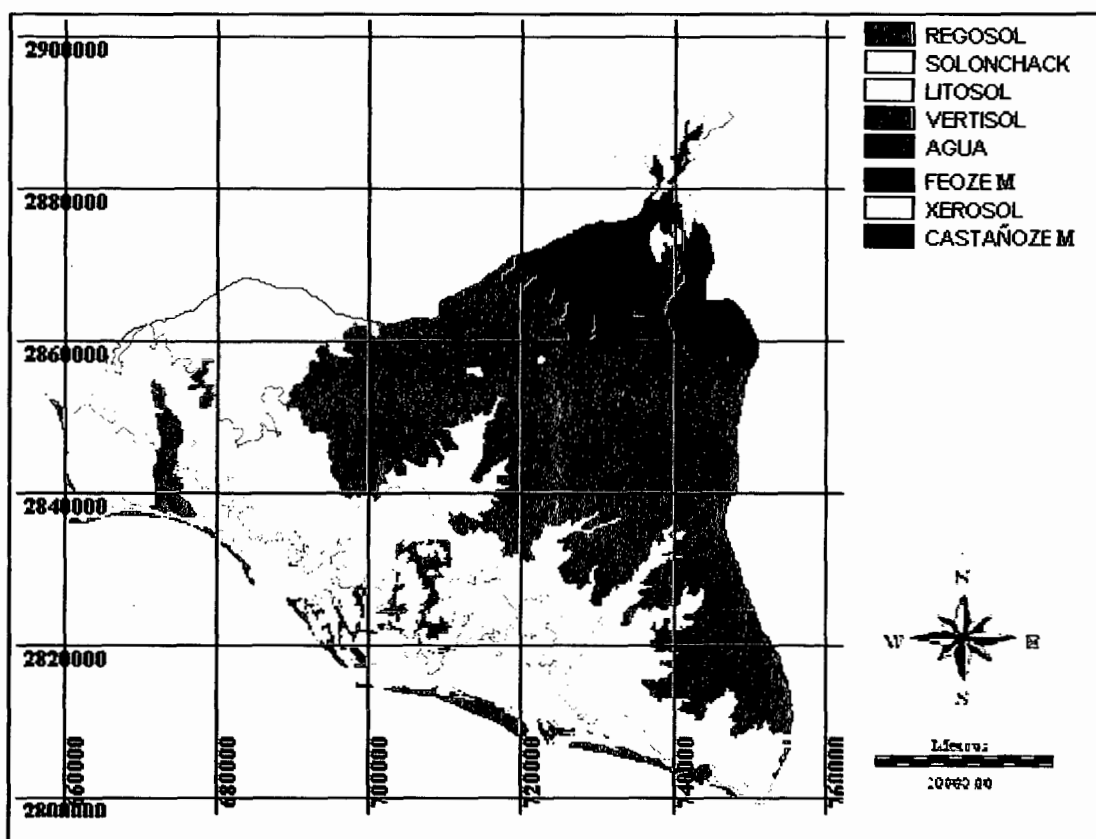


Figura 4. Mapa temático de los diferentes tipos de suelos de acuerdo a la clasificación FAO-UNESCO, presentes en la cuenca Lechuguilla-Ohuira-Navachiste.

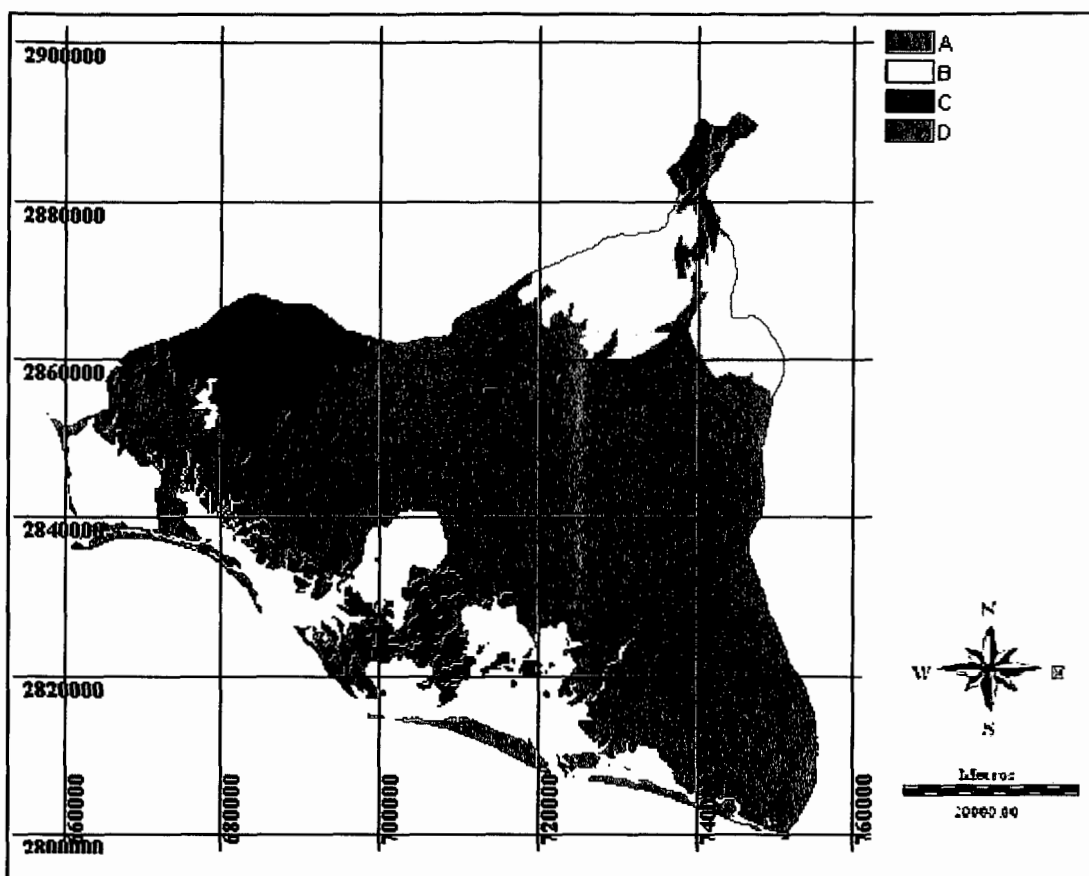


Figura 5. Grupos hidrológicos presentes en la cuenca

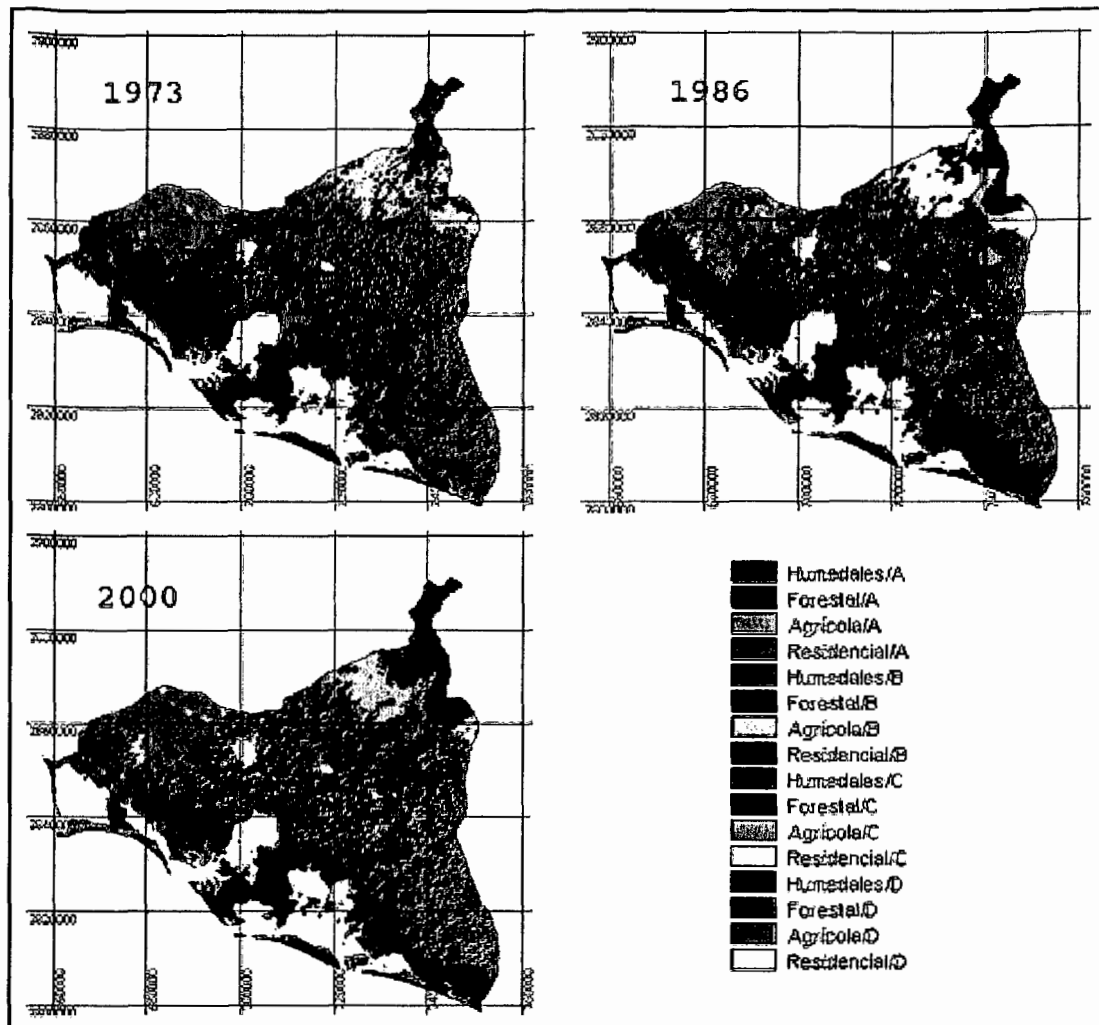


Figura 6. Mapas temáticos que combinan coberturas y usos del terreno con los grupos hidrológicos de suelos en la cuenca Lechuguilla-Ohuira-Navachiste.

Cuadro 10. Suelos presentados en la cuenca Lechuguilla-Ohuira-Navachiste con sus respectivas áreas, y su correspondencia a los grupos hidrológicos

Unidad de Suelo (FAO)	Grupo Hidrológico	Área (ha)
REGOSOL	A	18306.72
SOLONCHACK	D	103263.48
LITOSOL	C	21874.32
VERTISOL	D	176743.8
AGUA	0	1018.8
FEOZEM	B	35160.84
XEROSOL	C	30741.48
CASTAÑOZEM	D	932.04

Cuadro 11. Número de Curva para las combinaciones de cobertura y grupo hidrológico de suelo.

Cobertura	Grupo hidrológico			
	A	B	C	D
Agua/Humedales	100	100	100	100
Forestal	30	55	70	77
Residencial baja	64	75	82	85
Residencial alta	65	70	80	85

Cuadro 12. Volúmenes y profundidades de escurrimientos en la cuenca Lechuguilla-Ohuira-Navachiste, Sinaloa

Cobertura	Grupo hidrológico	Número de Curva	S	1973				1986				2000							
				Área (celdas)	Vol (m ³ /celda)	Profundidad de escurrimiento Q (cm)	Volumen de escurrimiento (m ³)	Área (celdas)	Vol (m ³ /celda)	Profundidad de escurrimiento Q (mm)	Volumen de escurrimiento (m ³)	Área (celdas)	Vol (m ³ /celda)	Profundidad de escurrimiento Q (mm)	Volumen de escurrimiento (m ³)				
HUMEDALES	A	100	0.0	20219	1205	33.5	24367514	19370	1466	40.7	28392217	21025	825	22.9	17341189				
HUMEDALES	B	100	0.0	19	1205	33.5	22898	0	0	0.0	0	0	0	0.0	0				
HUMEDALES	C	100	0.0	15690	1205	33.5	18909259	4993	1466	40.7	7318655	3041	825	22.9	2508183				
HUMEDALES	D	100	0.0	192101	1205	33.5	231516091	241037	1466	40.7	353307937	203200	825	22.9	167597125				
FORESTAL	A	30	23.3	25379	208	5.8	5281370	22350	340	9.5	7605660	22950	63	1.7	1436463				
FORESTAL	B	55	8.2	30127	618	17.2	18610171	35001	839	23.3	29371159	50603	320	8.9	16206572				
FORESTAL	C	70	4.3	60914	836	23.2	50926480	72055	1082	30.1	77951405	66593	489	13.6	32593411				
FORESTAL	D	77	3.0	99720	930	25.8	92721650	59266	1182	32.8	70071199	85254	569	15.8	48469883				
AGRICULTURA	A	64	5.6	2644	752	20.9	1987238	6584	989	27.5	6514802	4453	422	11.7	1877224				
AGRICULTURA	B	75	3.3	66606	904	25.1	60180786	61776	1154	32.1	71311990	46387	546	15.2	25325678				
AGRICULTURA	C	82	2.2	64219	994	27.6	63821613	64441	1250	34.7	80531273	71157	625	17.4	44459605				
AGRICULTURA	D	85	1.8	465705	1031	28.6	480168400	458377	1288	35.8	590605930	469400	658	18.3	309075961				
RESIDENCIAL 1	D	92	0.9	794	1115	31.0	885109	1170	1375	38.2	1608166	2204	736	20.5	1623224				
RESIDENCIAL 2	B	70	4.3	262	836	23.2	219042	263	1082	30.1	284522	0	0	0.0	0				
RESIDENCIAL 2	C	80	2.5	649	969	26.9	628561	954	1223	34.0	1166895	1671	602	16.7	1006492				
RESIDENCIAL 2	D	85	1.8	7965	1031	28.6	8212369	12149	1288	35.8	15653646	12902	658	18.3	8495309				
volumen total de escurrimiento anual								1.06 x10 ⁹				1.34 x10 ⁹				6.78 x10 ⁹			
volumen de precipitación total anual								1.27 x10 ⁹				1.55 x10 ⁹				8.75 x10 ⁹			
Porcentaje de lluvia escurrido (%)								83.4				86.5				77.5			

DISCUSIÓN

Los procedimientos de clasificación y digitalización aplicados permitieron producir un mapa temático de las coberturas y usos del terreno del 2000 con un coeficiente de Kappa (K') de 0.88 que corresponde a una agregación alta entre los datos de referencia y de la clasificación (Congalton y Green, 1999). Las clases Esteros y lagunas, Poblados y Granjas camaronícolas tuvieron una exactitud del productor y del usuario del 100% (Tabla 3). Para los esteros y lagunas, al ser la única clase de cobertura acuática, se pudo desarrollar una firma espectral característica sin generar confusión con el resto de las clases que representaron coberturas terrestres por lo que se pudo clasificar sin cometer errores de comisión u omisión. Por su parte, los poblados y granjas camaronícolas fueron incorporados al mapa temático como datos auxiliares por lo que tampoco presentaron algún tipo de error.

Al contrario de las clases arriba mencionadas, la vegetación secundaria fue la cobertura que se clasificó con menor exactitud del productor como del usuario. De 30 puntos de prueba clasificados como esta clase, 10 en realidad pertenecían a otra (error de comisión) y 10 puntos de prueba que en realidad pertenecían a la clase fueron clasificados en otra categoría (error de omisión). Una de las principales problemáticas para generar mapas de coberturas a partir de imágenes de satélite, es la confusión de respuestas espectrales (Palacios y Luna, 1996). En este trabajo la confusión surgió en algunas coberturas vegetales, debido a la similitud de su respuesta espectral, tal fue el caso de la vegetación secundaria, que incurrió dentro de las clases de agricultura y selva, pero que posteriormente fueron corregidas con datos producidos por la verificación en campo.

La verificación para los mapas de 1973 y 1986 no se realizó por no contar con datos históricos necesarios para la realización de la matriz de error, pero considerando que se

produjeron con procedimientos similares a los seguidos para producir el mapa del 2000, es valido suponer exactitudes similares a pesar de tratarse de imágenes capturadas con sensores diferentes (Berlanga-Robles y Ruiz-Luna, 2002). Partiendo de lo anterior, la exactitud total de cada mapa sería de alrededor del 90%, pero considerando que existe una propagación multiplicativa del error cuando se transponen los mapas para generar las matrices de detección de cambio (Singh, 1989), la exactitud de cada matriz sería de alrededor del 80%.

El porcentaje de cambio en el paisaje de la cuenca Lechuguilla-Ohuira-Navachiste de 1973 al 2000 fue de un 33% y se encontraron asociados principalmente al incremento de la agricultura y de las áreas urbanas, en este caso la ciudad de Los Mochis, desplazando principalmente a las clases de Marismas y Selvas, esta ultima perdiendo más del 24% de su extensión en los últimos 24 años. Resultados similares fueron obtenidos por Trelles (2000 y 2002) y Trelles y Ruiz (2001) para el municipio de Ahome, que el 50% de su extensión se ubica dentro de la cuenca.

Los principales cambios ocurrieron en el período que comprende de 1973 a 1986 con un porcentaje de cambio de 32%, lapso donde la agricultura tuvo su mayor crecimiento en la zona. Sin embargo, de 1986-2000 el cambio de nivel de paisaje fue un poco menor, 27%, pero un gran porcentaje nuevamente fue ocupado por las áreas urbanas y por la agricultura, además de sumarse las Granjas camaronícolas en la región, las cuales sustituyeron principalmente a las Marismas. Estos datos nos indican como se ha incrementado de manera considerable la agricultura y los Poblados a medida que ha crecido la población, cambiando de manera notable las coberturas vegetales naturales por coberturas culturales en relativamente pocos años. Trelles (2002) señala que los asentamientos humanos en el municipio de Ahome se han triplicado en poco menos de 30 años.

La agrupación de las coberturas y usos del terreno con base al modelo L-THIA, nos indica que la clase Forestal presentó un incremento de 1973 a 2000, esto se puede entender porque

dentro de esta clase se agrupó a la Vegetación secundaria, la cual le ha ganado terreno principalmente a las marismas y agricultura a causa de la intervención del hombre.

Una vez hecha la agrupación se prosiguió a la digitalización de los tipos de suelos dentro del área de estudio de acuerdo a la FAO-UNESCO, encontrando al Vertisol como el tipo de suelo de mayor distribución dentro del área de estudio. Los suelos de tipo Vertisol tienen como principal característica su alto contenido de arcilla, cualidad que lo hace especial para el desarrollo de la agricultura (INEGI, 1997), de esta forma la gran extensión con la que cuenta esta cobertura de terreno está ocupada principalmente por los Vertisoles. En este contexto, la asociación de estas variables dan gran productividad en la mayor parte de la región e impulsan al continuo crecimiento de la agricultura. Sin embargo, para el caso de los volúmenes de escurrimientos esta combinación propicia su aumento.

Dentro de los cuatro grupos hidrológicos de suelo, el tipo D es el de mayor escurrimiento. Los Vertisoles, Solonchak y Castañozem fueron agrupados en esta categoría, dado que se trata de suelos con alto contenido de arcillas lo que les confiere una textura fina. Así, el grupo D cubrió el 72% de área de la cuenca, en tanto que el principal uso del terreno fue Agrícola en todos los años analizados, por lo que se esperaba un aumento en la lluvia escurrida, sin embargo, la información generada indicó una ligera disminución al final, con un 83% en 1973, un 86% en 1986 y para el 2001 un 77%, que comparando los resultados obtenidos en la cuenca Lechuguilla-Ohuira-Navachiste con lo diversos trabajos en los que se ha aplicado el modelo L-THIA (Bhaduri *et al.*, 1997 y 2000; Zhan y Huang 2004; Ramsey 1999; Symeonakis 2004, Kim *et al.*, 2002; Pundey *et al.* 2000), el potencial de los escurrimientos depende más de las variaciones en las láminas de lluvia y en el potencial máximo de retención generados por los usos del suelo, ya que la expansión de la Vegetación secundaria en 1986 y en el 2000 sobre suelos desnudos dio una mayor retención del agua llovida que en 1973.

Así, la disminución de coberturas naturales y el crecimiento de las áreas urbanas y agrícolas junto con los eventos de lluvias regulares han impactado de manera significativa los volúmenes de escurrimiento en las cuencas a nivel mundial, no obstante en este estudio la falta de regularidad de lluvia entre los tres años de estudio no permite visualizar los impactos que han generado los cambios de usos del terreno y de coberturas sobre los patrones de escurrimiento (Bhaduri et al., 1997 y 2000). Sin embargo, el modelo L-THIA resulto ser un modelo sencillo capaz de estimar los volúmenes de los tres diferentes años en estudio, estableciendo los diferentes escenarios posibles al combinar los diferentes tipos de coberturas con los tipos hidrológicos del suelo presentes en la cuenca. De esta manera el modelo L-THIA nos puede auxiliar para tener una mejor planeación y manejo de los recursos naturales, principalmente los hidrológicos.

Estos aumentos a causa de los cambios de usos del terreno, han traído grandes repercusiones en diferentes regiones, pero de un caso especial, llama la atención las que se han venido presentando en las zonas tropicales, lugares donde se concentran las mayores precipitaciones que junto al subdesarrollo de la región conducen a inundaciones severas convirtiéndose en lugares de alto riesgo natural. Los cambios del uso del suelo y el crecimiento urbano puede ser inevitable en muchas cuencas, por lo que es mejor tomar medidas de planeación en donde se trate de proteger lo más que se pueda bosques, selvas, ríos, lagos y en general los recursos naturales, a través de la capacidad natural del medio.

CONCLUSIONES

El uso de imágenes de satélite, resultó ser una buena herramienta para la generación de mapas temáticos de coberturas y usos del terreno en la cuenca Lechuguilla-Ohuira-Navachiste necesarios para la aplicación del modelo L-THIA-SIG, basado en el método de número de curva, el cuál nos permitió evaluar el impacto promedio de la profundidad y volumen de escurrimientos anuales en la cuenca para los años 1973, 1986 y 2000.

De esta forma, el análisis multitemporal de las imágenes de satélite, determinó que el porcentaje de cambio de coberturas y usos del terreno dentro del área de estudio fue de 33.3% en tan solo 27 años. El paisaje actual de la cuenca Lechuguilla-Ohuira-Navachiste, esta principalmente dominada por la agricultura (44%), a causa del crecimiento que ha tenido en los últimos años esta actividad dentro de la cuenca, caracterizada por su alta productividad agrícola en todo el país. Además, el desarrollo de la camaronicultura ha provocado que las marismas sean la cobertura natural más impactada por el cambio del uso del terreno.

Por otro lado, el crecimiento de la clase poblados es evidente al aumentar casi al doble de 1973 al 2000, siendo la ciudad de Los Mochis el principal asentamiento humano. Este crecimiento, quizá en términos de extensión no signifique mucho a comparación de toda la cuenca, pero en términos hidrológicos esto genera impactos en los volúmenes de escurrimientos a consecuencia de la compactación del suelo.

En este contexto, la cantidad del volumen escurrido está en función de los tipos hidrológicos del suelo, los cuales previamente se digitalizaron de acuerdo a la clasificación FAO/UNESCO, arrojando al Vertisol como el de mayor presencia en la cuenca con casi un 50% de la extensión total. Ya agrupados los suelos FAO/UNESCO, a la base USDA, encontramos que los tipos C y D cubren el 86% de la cuenca, que de acuerdo a sus características nos indica poca

permeabilidad, esto aunado a el desarrollo de la agricultura sobre su superficie, nos da como resultado un bajo potencial de retención, por tanto el mayor porcentaje de escurrimientos totales se presentan en esta combinación. De manera contraria la presencia de bosques junto a los suelos arenosos aumenta la capacidad de retención de agua, sin embargo estas características cada vez son menos frecuentes, sin embargo la presencia de vegetación secundaria en suelos que antes estaban descubiertos ha generado el aumento de la clase Forestal, lo cual ha mitigado el impacto del crecimiento urbano y agrícola.

En 1973 el volumen de escurrimiento anual calculado con el modelo L-THIA fue de 1.058×10^9 m³, en cambio en el año 2000 se calculo un volumen de escurrimiento anual de 8.750×10^8 m³, con un porcentaje de lluvia escurrida de 83% y 77% respectivamente.

En conclusión estos cálculos señalan que las actividades antropogénicas, principalmente la agricultura, han generado cambios en el paisaje en los últimos años contribuyendo a la degradación del medio y al aumento de superficies impermeables, pero de manera contraria, los volúmenes de escurrimientos se han reducido por la disminución del régimen de lluvia y por la presencia de coberturas vegetales en terrenos que antes estaban al descubierto y que propiciaban el aumento de la velocidad de escurrimientos y por tanto el volumen.

Por otra parte, la aplicación del modelo L-THIA, resulto ser una técnica muy importante para estimar los impactos del cambio del uso del terreno y su relación con la cantidad anual de los volúmenes de escurrimientos en la cuenca Lechuguilla-Ohuira-Navachiste. Al estar el modelo enlazado a un SIG nos permite tener un mejor manejo y visualización de los resultados, los cuales pueden ayudar a la planeación de los usos del terreno en los diferentes tipos de suelos. Si se planea localizando los usos del terreno que generan grandes cantidades de escurrimientos y los suelos que naturalmente tienen poca infiltración se reducirán los impactos hidrológicos sobre las coberturas. Es decir, dentro de una planeación se puede decidir cambiar los usos del terreno

basándose en los tipos de suelos para minimizar los impactos que se pudieran dar en una cuenca, esto porque el mismo uso del terreno con los diferentes tipos del suelo tendrá diversos impactos

REFERENCIAS

- Anaya, G. M., M. R. Martínez. M, A. Trueba. C, B. Figueroa. S y O. Fernández. M., 1991. Manual de Conservación del Suelo y del Agua. Colegio de Postgraduados, Chapingo México.
- Barale V y S. Folving., 1996. Remote sensing of coastal interactions in the Mediterranean region. *Ocean & Coastal Management*. 30 (2): 217-233.
- Berlanga, R. C. A., 1999. Evaluación de las condiciones actuales y del cambio en los paisajes de humedales de la Costa sur de Sinaloa, México: una aproximación con el uso de datos provenientes de sensores remotos. Tesis de Maestría. UNAM, México. 111 pp.
- Berlanga, R. C. A. y A. Ruiz L., 2002. Land-use mapping and change detection in the coastal zone of northwest México using remote sensing techniques. *Journal of Coastal Research* 18 (3): 514-522.
- Bhaduri, B, J. Harbor, B. Engel y M. Grove., 2000. Assessing water-scale, long-term hydrologic impacts of land-use change using a GIS-NPS model. *Environmental Management*. 26 (6): 643-658.
- Campbell, J.B., 1996. Introduction to remote sensing. Taylor & Francis. London. 622 pp.
- Congalton, R.G y K. Green., 1999. Assesing the accuracy of remote sensing data: Principles and practices. Lewis Publisher. Estados Unidos. 137 pp.
- Chuvieco, E., 2002. Fundamentos de Teledetección Espacial. RIALP, España. 565 pp.
- Davis, S. N y R. De Wiest., 1971. Hidrogeología. Ariel, Barcelona, España. 112 pp.
- Dobson, J. E., E. A. Bright, R. L. Ferguson, D. W. Field, L. L., Wood, K. D. Haddad, H. Iredale, III, J. R. Jensen, V. V., Klemas, R. J. Orth, and J. P. Thomas., 1995. NOAA costal change analysis program (C-CAP): Guidance for regional implementation. NOAA Technical Report NMFS 123, Scientific Publications Office, National Marine Fisheries Ser-vice, Seattle, Washington, 92 pp.
- Eastman, J. R., 1995. IDRISI for WINDOWS. User's guide. IDRISI Production. Clark University, USA.
- Eastman, J. R., 1999. IDRISI32. Guide to GIS and Image Processing. Vol. 1 Clark University, USA.
- Harbor M. J., 1998. A practical method for estimating the impact of land-use change on surface runoff, groundwater recharge and wetland hydrology. *Journal of the American Planning Association*, 60 (1): 95-108.

- Hynes, H. B. N., 1976. The ecology of running waters. Liverpool University Press. Gran Bretaña. 202 pp.
- INEGI., 1995. Estudio hidrológico del estado de Sinaloa. Gobierno del estado de Sinaloa. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. 13p
- INEGI., 1999. Ahome. Estado de Sinaloa. Cuaderno Estadístico Municipal Ahome. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. 185p.
- INEGI. 2000. Guasave. Estado de Sinaloa. Cuaderno Estadístico Municipal Guasave. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. 185p.
- INEGI., 2002. Sinaloa. Anuario Estadístico. Gobierno del Estado de Sinaloa. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- Kim, Y., B. Engel, V. Larson y Duncan., 2002. Runoff impacts of land use change in Indian River Lagoon Watershed. Journal of hydrologic Engineering. 7 (3) 245-251.
- Klemas, V. V., 2001. Remote sensing of Landscape – level coastal environmental indicators. Environmental Management 27: 47-57.
- Landgrebe, D and L. Biehl., 1995. An introduction to MultiSpec 1.2. Purdue Research Foundation. Indiana. USA. 85 pp.
- Ma, Y., 2004. L-THIA: A useful hydrologic impact assessment model. Nature and Science. 2(1).68-73pp
- Margalef, R., 1983. Limnología. Omega, Barcelona, España. 1010 pp.
- Martínez S. A. R., 2003 Estudio sobre el uso del suelo en las subcuencas bahía Navachiste y Río Sinaloa al Noroeste de México. Tesis de Maestría. CIAD, Mazatlán, Sinaloa, México. 81 pp.
- Mas, J. F., 1999. Monitoring land-cover changes: a comparison of change detection techniques. International Journal of Remote Sensing 20: 139-152.
- Melesse, A., D. Graham y J. Jordan, J., 2003. Spatial distributed watershed mapping and modeling: GIS- based storm runoff response and hydrograph analysis: Part 2. Journal of Spatial Hydrology.3 (2):
- Ojima, D.S, K. Galvin y B. Turner, B., 1994. The global impact of land-use change. BioScience 44(5): 300-304.
- Palacios P, J. L., 1992. Introducción a los sistemas de información geográfica. Instituto de Geografía, UNAM. 56pp. México.

Pandey, S., R. Gunn, K. Jae, B. Engel y J. Harbor., 2000. Developing and Application of GIS-based model for assessing the long-term hydrologic impacts. *Urban and Regional Information Systems Journal*. 12 (4) 5-17.

Porta, J., M. López. A y C. Roquero., 2003. *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. Mundi-Prensa, España. 929 pp.

Ramakrishna, B., 1999. Estrategias de extensión para el manejo integrado de cuencas hidrográficas: conceptos y experiencias, Proyecto IICA/GTZ sobre Agricultura, Recursos Naturales y Desarrollo Sostenible, IICA/BMZ/GTZ. San José, Costa Rica.

Ramsey III, W. E., G. Nelson y S. K. Sapkota., 2001. Coastal Change Analysis Program Implemented in Louisiana. *Journal of Coastal Research*. 17 (1): 53-71.

Richards, A. J. y X. Jia., 1999. *Remote sensing digital image analysis*. Springer. 363 pp.

Rzedowski, J. 1986. *Vegetación de México*. LIMUSA, México. 432 pp.

Sabins, F. F., 1996. *Remote sensing: principles and interpretation*. Freeman, USA. 494 pp.

Singh, A., 1989. Digital change detection techniques using remotely-sensed data. *International Journal of remote sensing* 10: 989-1003.

Symeonakis, E., A. Calvo., 2004. A landuse change and land degradation study in a Mediterranean catchment using Remote Sensing and GIS. *Environmental Management*. 25 (3) 12-18.

Trelles, R. N. A., 2002. Caracterización del paisaje del municipio de Ahome, Sinaloa, México, utilizando técnicas de percepción remota y sistemas de información geográfica. Tesis de Maestría. CIAD Mazatlán, Sinaloa, México. 109 pp.

Treviño, G. E., C. A. Muñoz. R, C. Cavazos. C y L. Barajas. C., 2002. Evaluación del flujo hídrico superficial en la sierra de San Carlos, Tamaulipas. *Ciencia UANL*. 5 (4): 525-530.

USDA, Soil Conservation Service., 1986. *Urban hydrology for small watersheds*, SCS Technical Release 55, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.

Wetzel, R. G., 2001. *Lake and River Ecosystems*. Academic Press, An Elsevier Science Imprint. USA. 316 pp.

Xiaoyong, Z Y H. Min-Lang., 2004. ArcCN-Runoff: an ArcGIS tool for generating curve number and runoff maps. *Environmental Modelling and Software* 19: 219-234.