Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería

"Evolución De La Escorrentía Potencial En Una Cuenca Urbana Por Cambios En El Uso De Suelo (Caso Del Río Querétaro)."

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de
Ingeniero Civil
Presenta:
Daniel González Correa
Dirigido por:
M.I. Carlos Javier Villa Alvarado

SINODALES

M.I. Jorge Martínez Carrillo _____ Firma

M. en C. Omar Bautista Guerrero _____ Firma

Dr. Eduardo Álvarez Mendiola _____ Firma

Dr. Aurelio Domínguez González
Director de la Facultad

M. D. M. Carmen Sosa Garza
Secretario Académico

Centro Universitario
Querétaro, Qro. Diciembre 2013
México

RESUMEN

El presente documento se basa en la utilización de la percepción remota para determinar la magnitud de cobertura natural en un periodo de 30 años y por medio de la percepción remota del tipo de suelo y cobertura en la cuenca. , se emplea el programa SHETRAN que es un modelo distribuido de base física, utilizado en este documento para calcular los cambios incrementales de los escurrimientos pluviales en la cuenca del río Querétaro por medio del caudal máximo para una misma precipitación.

Para llevar a cabo lo anterior, se emplearon imágenes de satélite LANDSAT, disponibles para diferentes años, que cuentan con una aceptable visibilidad; estas fueron clasificadas por medio de ARCMAP, utilizando el módulo de análisis espacial y agregando las imágenes en un formato *raster*. Se han incorporado interpretaciones de la cuenca tanto de la composición edafológica, de uso de suelo (áreas verdes, urbanas y superficies cultivables o alteradas), geología (con las diferentes estratigrafías que le conforma).

Por medio de ARCMAP, el cual es un Sistema de Información Geográfica, se lleva a cabo la cuantificación de los pixeles clasificados que cuentan con una misma tonalidad de color, los cuales son asignados por medio de asignaciones basadas en el conocimiento de la cuenca y de esta forma obtener como resultado un mapa clasificado de pixeles procesados para representar los resultados de forma numérica.

Los datos anteriores preparados para ser leídos en SHETRAN, el cual es un modelo de base física que permite llevar a cabo el análisis del volumen de los intercambios de agua que se encuentra en el ambiente, la zona saturada y no saturada considerando los procesos de evapo-transpiración y los intercambios entre la superficie y el subsuelo, todo por medio de las ecuaciones de Rutter, Penman-Monteith, Richards, Boussinesq y Saint Venant. Para el presente documento se ha evaluado solo la escorrentía directa.

Finalmente fueron simuladas las condiciones hidrológicas de la cuenca, de manera que los resultados obtenidos muestran un crecimiento de la traza urbana que se ha acentuado a partir del año 2003 y en donde a partir del año 2009 este crecimiento es exponencial; de la misma manera los gastos calculados para escenarios de una misma cantidad de agua acumulada en 24 horas, da como resultado que el gasto máximo casi se ha duplicado en magnitud, pasando de 59.86 m3/s a 111.04 m3/s.

Palabras clave.

Clasificación imágenes satélite, uso de suelo, SHETRAN, modelación hidrológica.

ABSTRACT

This document is based on the use of remote sensing to determine the natural cover extent of 30 years and through remote sensing of soil type and watershed cover. The SHETRAN program is a physically based distributed model used in this paper to calculate the incremental changes of stormwater runoff in the basin through the maximum outflow with the same precipitation.

To accomplish this, available LANDSAT satellite images which have an acceptable visibility were used, for different years, these were classified by ARCMAP, using the spatial analysis module and adding images to a raster format. Interpretations have been incorporated in the basin both pedological composition, land use (green, urban and arable areas or altered surfaces), geology (with different layers).

Through ARCMAP, which is a Geographic Information System, is carried out to quantify the classified pixels that have the same color tone, which are allocated through assignments based on knowledge of the watershed and thus obtain a map as a result free of processed pixels to represent the results numerically.

The above data ready to be read in SHETRAN, which is a physically based model that allows to conduct the analysis of the exchanges volume of water found in the environment, the saturated and unsaturated zone considering evaporation-transpiration processes and exchanges between the surface and subsurface, primarily through equations Rutter, Penman-Monteith, Richards, Saint Venant and Boussinesq. In this thesis has been assessed only direct runoff.

Finally were simulated hydrological conditions of the basin, so that the results show an increase in the urban land-use that has increased since 2003, where from 2009 this growth is exponential, in the same way the discharge calculated for scenarios of the same precipitation accumulated in 24 hours, as a result the maximum outflow has almost doubled in size, from 59.86 m3/s to 111.04 m3/s.

Key words

Satellite images classify, land-use, SHETRAN, hydrologic simulation.

DEDICATORIA

A mis padres y hermanos por ser el pilar fundamental en todo lo que soy, en toda mi educación, tanto académica, como de la vida, por su incondicional apoyo perfectamente mantenido a través del tiempo.

Todo este trabajo ha sido posible gracias a ellos.

AGRADECIMIENTO

A Dios.
Por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad y amor.

A mi madre.
Por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, sus valores, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien, pero más que nada, por su amor.

A mi padre.
Por los ejemplos de perseverancia y constancia que lo caracterizan y que me ha infundado siempre, por el valor mostrado para salir adelante y por su amor.

A mi maestro.
M.I. Carlos Javier Villa Alvarado por su gran apoyo y motivación para la culminación de mis estudios profesionales y para la elaboración de esta tesis.

ÍNDICE GENERAL

1 INTRODUCCIÓN 10
1.1 ANTECEDENTES 10
1.2 JUSTIFICACIÓN 17
1.3 HIPÓTESIS Y OBJETIVOS 18
1.3.1 Hipótesis 18
1.3.2 Objetivo general 18
1.3.3 Objetivos específicos 18
2 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA 20
2.1 Interpretación de cartografía satelital 20
2.2 Variables 20
2.3 Percepción remota 32
3 METODOLOGÍA 38
3.1 Cartografía satelital 38
3.1.1 Tipo de imágenes 38
3.1.2 Combinación de bandas con LANDSAT 39
3.1.3 Identificación de usos de suelo 40
3.2 MODELO DE BASE FÍSICA 51
4 MODELOS HIDROLÓGICOS 52
4.1 Tipos de modelos hidrológicos 52
4.2 Determinación de índice de uso de suelo 53
4.3 Razón de cambio en el proceso lluvia-escurrimiento 53
4.4 SHETRAN 55
4.4.1 Uso de suelo: 63
4.4.2 Edafología 64
5 RESULTADOS 66
5.1 Cambios de uso de suelo 66
6 CONCLUSIONES 68
7 REFERENCIAS 70

Índice de figuras

Tabla 1. Uso de suelo para agricultura 21
Tabla 2. Uso de suelo para matorral 21
Tabla 3. Uso de suelo para pastizal 22
Tabla 4. Uso de suelo para bosque 23
Tabla 5. Uso de suelo urbano, erosión, industrial y áreas abiertas 23
Tabla 6. Clasificacion desigada para el estudio de uso de suelo 46
Tabla 7. Muestra de los parámetros de uso de suelo utilizados de acuerdo a los diferentes usos de suelo de la cuenca del Río Querétaro. 64
Tabla 8. Variación de las áreas a través de los diferentes años dentro de la cuenca de Querétaro. 67
Tabla 9. Variación de las áreas englobando áreas verdes y suelo cultivable, zona urbana y vías terrestres. 67

CAPÍTULO 1

1 INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

Ya que menos del 30% de la superficie de nuestro planeta es tierra, no toda ella puede ser utilizada por lo cual constituye un recurso natural valioso y sometido, en muchas partes del mundo está sometida a una notable presión por el uso excesivo de esta misma.

En México, como en todo el mundo, la distribución de habitantes es desigual: existe desbalance poblacional, encontrando regiones donde hay sobrepoblación y en otras con viviendas dispersas; por lo general las concentraciones poblacionales de los centros urbanos se encuentran más densamente pobladas que las comunidades rurales.

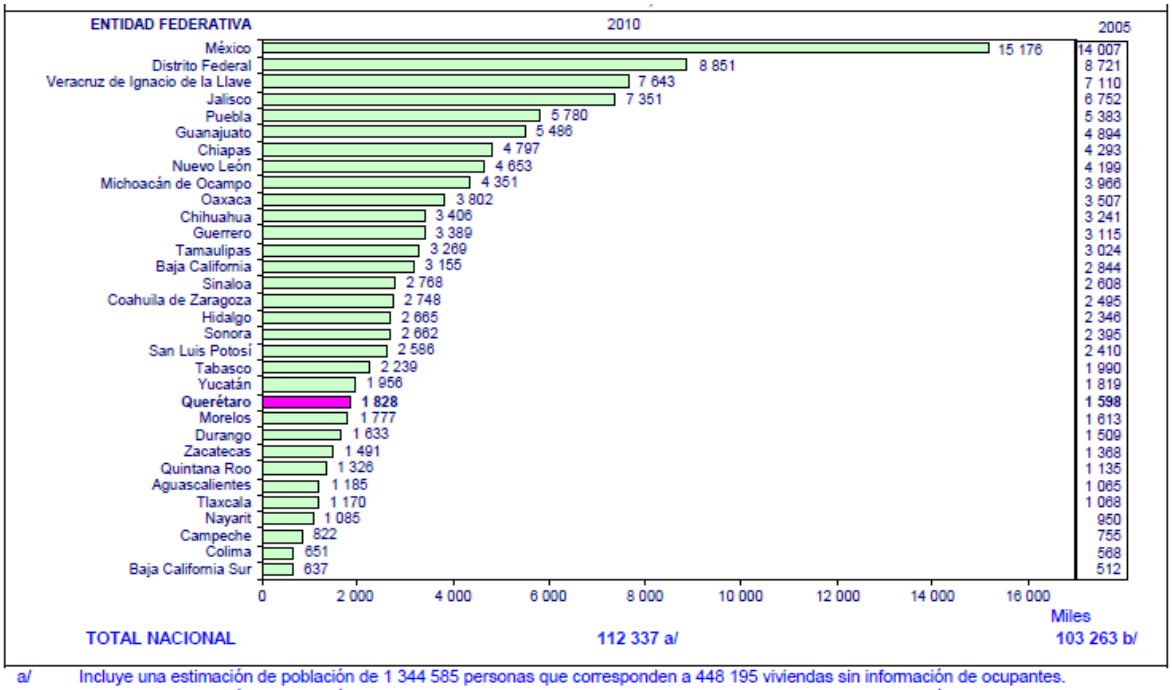


Figura 1. Densidad poblacional [1]

En el 2010, la densidad poblacional de México fue de 57 personas por cada kilómetro cuadrado [1]. Para ese mismo año en Macao (China) se tenía una densidad poblacional de 19,486 personas por cada kilómetro cuadrado siendo el territorio más poblado del mundo.

Mientras que para el Estado de Querétaro se presentó una densidad de población de 156 habitantes/km^2 siendo una de las 10 entidades con mayor índice de densidad poblacional dentro del territorio nacional ocupando la octava posición, siendo el Distrito Federal el primer lugar con 5,920 habitantes/km^2.

En consecuencia, es importante tener una visión correcta del uso y ocupación territorial actual, además de determinar por medio de los Planes Municipales y Estatales, si éste es el más apropiado, pues todas las alteraciones a las cuencas hidrológicas tienen repercusiones hidrológicas que alteran las condiciones de equilibrio existente.

En los últimos años, se han producido grandes avances en las técnicas de análisis y representación cartográfica que se utilizan en el estudio de los usos del suelo y sus cambios, sin embargo no se conoce de manera adecuada la razón de cambio (índices) en que este crecimiento se presenta en la región y la magnitud y alteraciones que este cambio representa como son consecuencias hidrológicas a la cuenca, erosión y la potencialidad de afectaciones a los bienes, vidas humanas e infraestructura.

Por otra parte la diversidad en la cubierta superficial del territorio nacional es diversa y dada esta riqueza natural, se vuelve compleja; existen bosques templados (de coníferas y encinos), bosques mesófilos de montaña, selvas (húmedas y subhúmedas), matorrales xerófilos y pastizales, entre otros tipos de vegetación. En 2002, cerca de 73% de la superficie nacional estaba cubierta por vegetación natural, mientras que el restante 26% lo ocuparon zonas agropecuarias, de plantaciones forestales, urbanas y cuerpos de agua. Los matorrales xerófilos constituyen la formación vegetal predominante (26% de la superficie nacional), seguidos por los bosques templados (17%) y las selvas (16%) [2].

Los Estados del país que conservaban en 2002 una mayor superficie de vegetación natural remanente fueron Baja California, Baja California Sur, Chihuahua, Coahuila, Quintana Roo y Sonora (más de 80% de su territorio). En contraste, en el Distrito Federal, Estado de

México, Michoacán, Morelos, Tabasco, Tlaxcala y Veracruz la vegetación natural no cubría más del 35% de su territorio [2].

En la zona urbana de Querétaro, el cambio de uso de suelo responde a las necesidades crecientes de la zona geográfica y estratégica del centro de México por el crecimiento económico e industrial, cada día cobra una mayor importancia para el crecimiento económico de la región.

La transformación de la cubierta vegetal en México y el mundo ha sido impulsada, en gran parte, por el crecimiento de la población y algunas de sus consecuencias, tales como la demanda de alimentos y la ampliación de la infraestructura. Entre las consecuencias más importantes del cambio de uso del suelo están las alteraciones en los ciclos biogeoquímicos, la pérdida de la biodiversidad y sus servicios ambientales asociados y el cambio climático global.

Según la *Carta de Uso Actual del Suelo y Vegetación serie III*, para el año 2002 aún se conservaba poco más de 70% de la superficie original de bosques, 56% de las selvas, 77% de los matorrales y sólo 55% de los pastizales, lo que en teoría representaría una pérdida histórica neta de aproximadamente 250 mil kilómetros cuadrados de selvas, 129 mil kilómetros cuadrados de bosques templados, 155 mil kilómetros cuadrados de matorrales y más de 83 mil kilómetros cuadrados de pastizales [2].

En la Figura 2 se aprecia el cambio de uso de suelo en la zona poniente de la ciudad de Querétaro, vista desde el cerro donde se encuentra el templo de La Cruz, en dirección al Acueducto (vista en dirección Oriente a Poniente), en donde en cerca de un siglo el cambio de uso de suelo es muy evidente en comparación de la Figura 3, donde se puede apreciar que en casi su totalidad el área que se muestra ha sido utilizada para construir viviendas en su mayoría. Además se muestra en la Figura 4 como en los alrededores del centro de Querétaro no existían edificaciones y la mayoría del asentamiento se presentaba en la parte central del valle.

Figura 2. Imagen de Querétaro en el año de 1919

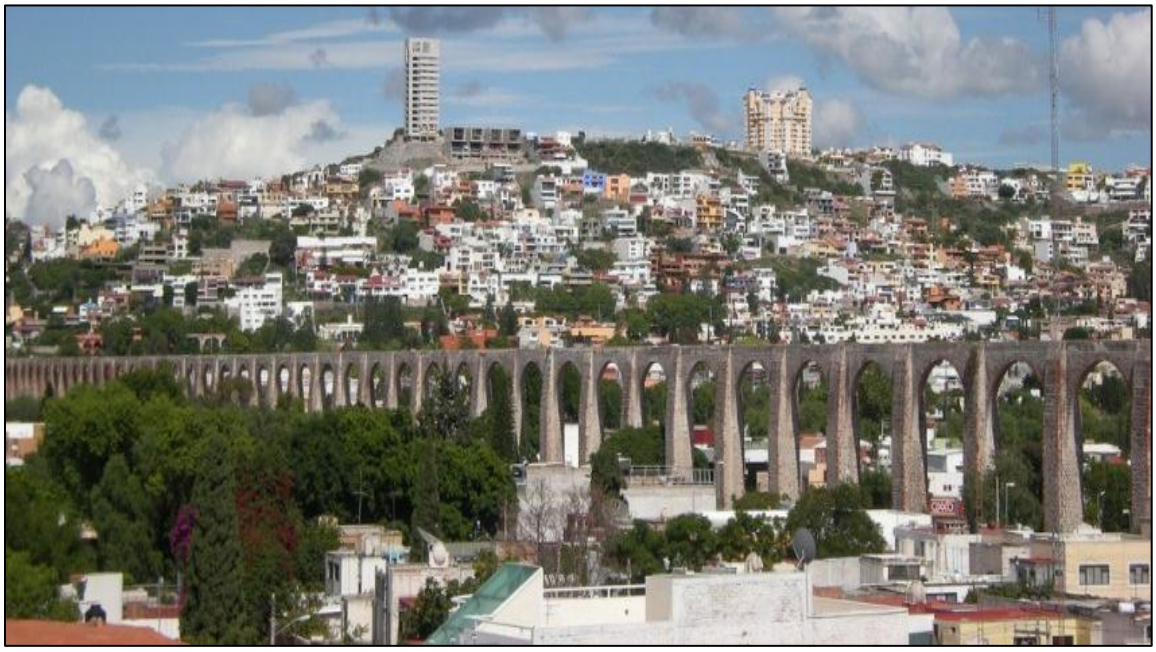


Figura 3. Imagen de Querétaro año 2013.

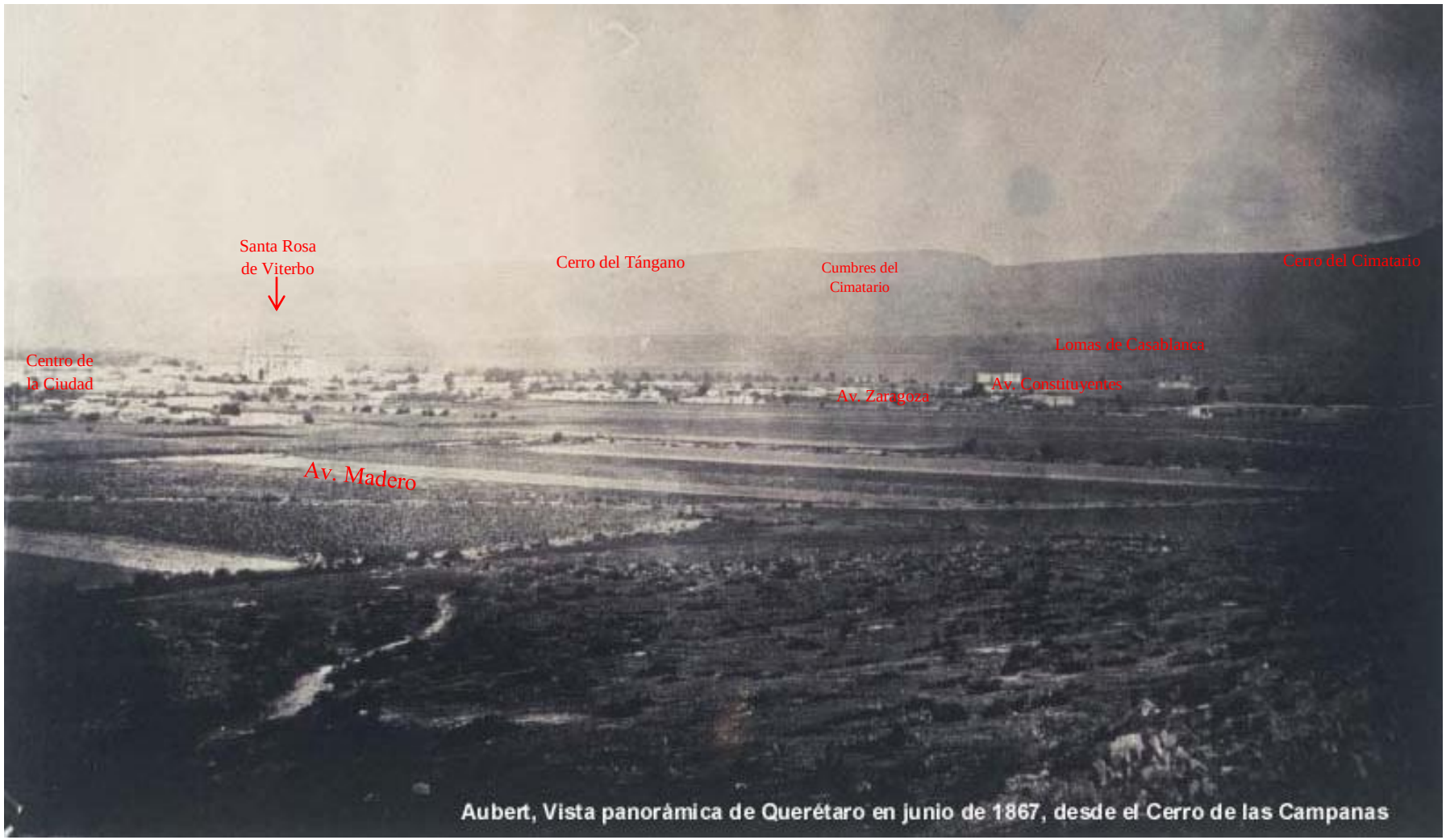


Figura 4. Vista panorámica de Querétaro 1867, desde el Cerro de las Campanas. Fuente: Fotografías antiguas en Querétaro, del autor de origen francés Francois Aubert, 1867.

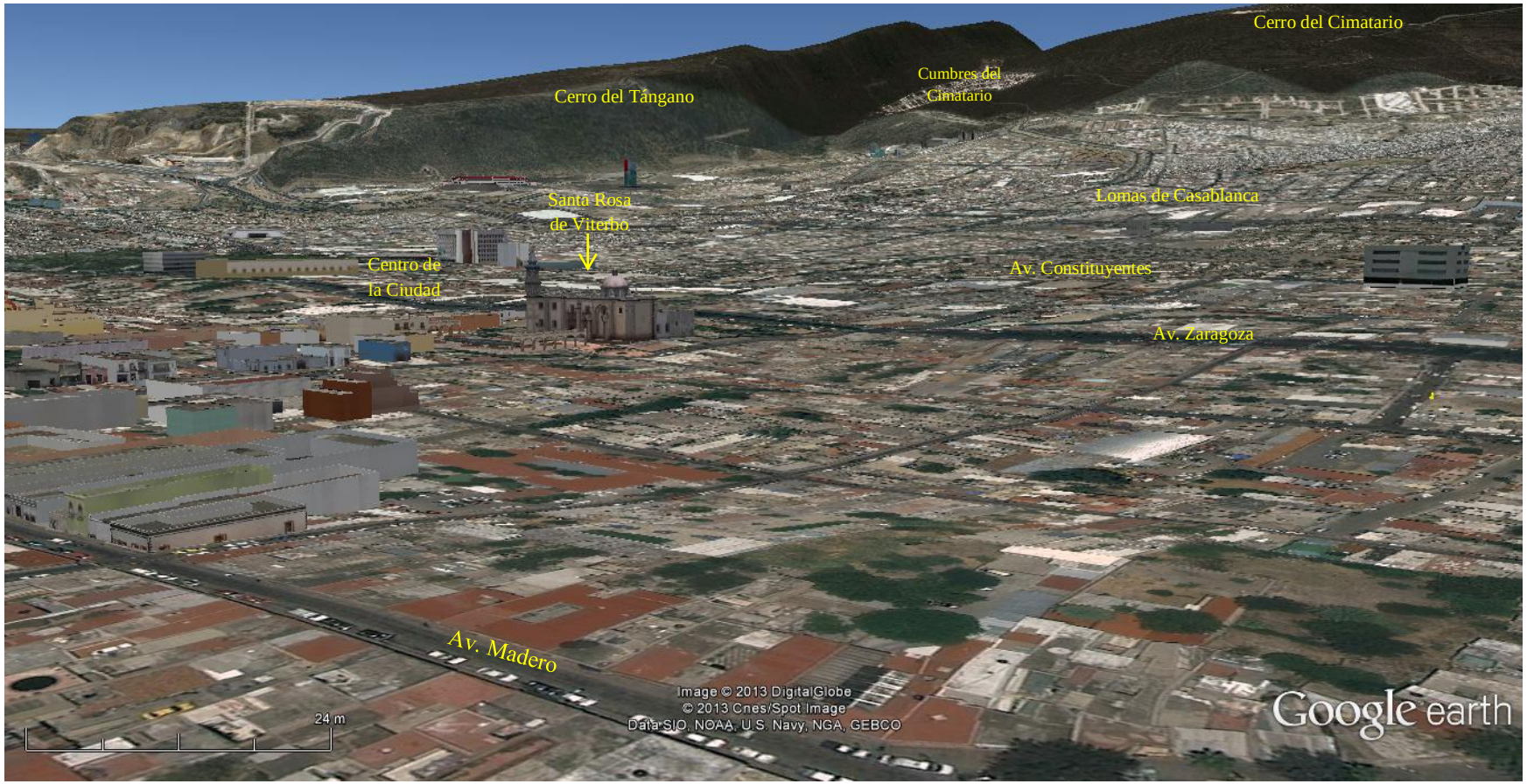


Figura 5. Vista panorámica de Querétaro 1867, desde el Cerro de las Campanas. Fuente: Google Earth, 2013.

Figura 6. Crecimiento de la población en el Estado de Querétaro [3]

Como se puede apreciar en la Figura anterior, de 1900 a 1940 el crecimiento de la población se mantuvo constante, presentando una disminución durante los años 1910 y 1921 con una tasa de crecimiento negativa de 0.94 por ciento, esta pérdida de habitantes se relaciona a la lucha armada de 1920 (guerra de La Revolución Mexicana) [3], y después de 1940 el incremento la población creció de manera importante debido al proceso de industrialización y la cercanía con el Distrito Federal como principales factores [3].

Entre 1993 y el año 2002, alrededor de 2.8 millones de hectáreas en el país cambiaron de vocación principalmente bosques, selvas, matorrales y pastizales para convertirse a otros usos (comercial e industrial), todo ello a un ritmo de cerca de 306 mil hectáreas por año. En términos netos, los ecosistemas más afectados entre esas fechas fueron las selvas (se perdieron alrededor de 1.3 millones de hectáreas), seguidas por los matorrales (cerca de 953 mil hectáreas) y los bosques templados (aproximadamente 370 mil hectáreas).

En ese mismo periodo, las entidades que mayor porcentaje de su vegetación natural perdieron (entre selvas, bosques, matorrales, pastizales y otros tipos de vegetación) fueron

Veracruz (cerca de 19%), Tabasco (alrededor de 11%) y Chiapas (8%), mientras que Nayarit, Durango, Baja California Sur y Querétaro perdieron menos del 0.5% de su superficie remanente de vegetación natural [2].

Es importante mencionar que en el caso del Estado de Querétaro, este se encuentra inmerso en el altiplano mexicano en donde la vegetación corresponde a dos porciones del centro del país:

- La Sierra Gorda y Sierra Queretana, que es una región orográfica de la zona de influencia del Golfo de México y la Sierra Madre Oriental, con un relieve de origen sedimentario que se caracteriza por altitudes sobre el nivel del mar mayores a los 3,000 msnm.
- La zona del semi-desierto nacional que influye a la zona de influencia de los municipios de El Marqués, Huimilpan, Villa Corregidora, Pedro Escobedo, Cadereyta, Colón y Querétaro.

1.2 JUSTIFICACIÓN

El aumento poblacional acelerado, asociado con un crecimiento desordenado de las ciudades, evidencia la falta de planificación y la necesidad de establecer pautas para formular un plan integral de ordenamiento territorial. Este crecimiento urbano implica serios problemas sobre el entorno debido a las transformaciones inherentes a este proceso.

Dentro de los problemas mencionados, uno de los más serios es el asociado con cuestiones hidrológicas e hidráulicas siendo las inundaciones en el entorno urbano un reflejo de esta situación que cada vez presenta un acentuado crecimiento.

A la par uno de los problemas más graves a los cuales se enfrentan las poblaciones modernas es el manejo inadecuado de los recursos hídricos, debido a que en muchas municipalidades y entidades federativas, no se cuenta con una planeación adecuada de los sistemas de drenaje pluvial y, en algunos casos, éste ni siquiera ha sido contemplado.

En consecuencia, los fenómenos hidrológicos pueden causar inundaciones, así como daños de diversa índole tanto materiales como sanitarios (Mobayed, 2008).

1.3 HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

1.3.1 Hipótesis

El desarrollo urbano ha avanzado durante los últimos años y de la misma manera los diferentes tipos de uso de suelo han cambiado por la utilización de estos para ser aprovechados como área urbana, por tanto los usos de suelo en los últimos años han tenido cambios significativos en la cantidad de uso de suelo urbano.

El uso de suelo actual de la cuenca, presenta un incremento substancial en el potencial de escurrimientos pluviales, razón por la cual las inundaciones que se presentan en el área de la cuenca y principalmente en la zona urbana se deben principalmente al acelerado crecimiento de la traza urbana y a los cambios de uso de suelo.

1.3.2 Objetivo general

Representar de manera gráfica la evolución de los cambios de los usos de suelo en la cuenca del río Querétaro lo cual está fuertemente relacionarlo con el escurrimiento dentro de la cuenca.

Calcular el cambio de los escurrimientos en la cuenca, dados los cambios en el uso de suelo, empleando para ello una precipitación de la misma magnitud en las diferentes configuraciones de cuencas, para los diferentes años analizados.

1.3.3 Objetivos específicos

Presentar de forma cronológica el comportamiento de los diferentes tipos de uso de suelo durante los últimos 30 años y la generación de escurrimientos potencial dado el cambio en los usos de suelo de la cuenca por medio de la identificación de los usos de suelo de las diferentes imágenes satelitales disponibles, en un periodo de 30 años.

Funcionamiento paramétrico del programa SHETRAN y su aplicación en los escurrimientos pluviales a la descarga de la cuenca del río Querétaro.

Determinar la razón del cambio de uso de suelo en el tiempo de acuerdo a la clasificación de imágenes de satélite.

CAPÍTULO 2

2 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1 Interpretación de cartografía satelital

La cartografía satelital es de utilidad para tener una representación gráfica fiable del territorio. Actualmente se cuenta con acervos recopilados de los diferentes años en periodos aproximados de 5 años de espaciamiento a través de los cuales se puede obtener una mejor comprensión de los fenómenos de la cuenca de estudio, su localización, tamaño y distribución [4]. Por medio de esta información y con ayuda de las imágenes de satélite LANDSAT ETM7+ (o disponibles) se obtendrá la clasificación de uso de suelo y sus cambios durante los últimos 30 años.

2.2 Variables

Las variables más significativas a estudiar son: cambio de uso de suelo, escurrimiento potencial y evaporación potencial de la cuenca. Todas las variables de acuerdo a los diferentes escenarios de simulación.

- ***Uso de suelo o vegetación actual***

Se llevará a cabo la clasificación de usos de suelo por medio de la manipulación de las bandas visibles de satélite. Con los resultados de los diferentes usos de suelo, se determinarán los diferentes índices de cambio de cada clasificación de la cuenca de estudio y por medio de ellos determinar la razón de cambio en los índices de utilización del territorio.

El uso de suelo actual se obtuvo de trabajos realizados por CONCYTEQ a través del Centro Queretano de Recursos Naturales (CQRN) el cual describe el uso de suelo en base a recorridos fotográficos de toda la zona, la cartografía del INEGI escala 1.250,000 de varios años, estudios recientes de la zona, cartografía digital del mismo CQRN, y el uso de equipo de posicionamiento GPS e imágenes de satélite Landsat TM correspondientes.

En esta área de la cuenca la vegetación natural ha sido desplazada por agricultura, zonas urbanas, industriales y aun granjas avícolas.

El crecimiento de la capital y un incremento en las áreas agrícolas de riego, particularmente al norte de Santa Rosa Jáuregui, en Querétaro y alrededor de Chichimequillas en El Marqués, representan los cambios más notables en el uso del suelo dentro de la cuenca.

A continuación se muestran las tablas donde describen los usos de suelo más comunes en la zona de Querétaro.

Tabla 1. Uso de suelo para agricultura

Uso de suelo o vegetación actual	Clase de uso de suelo	Descripción
Agricultura	Sustitución de la vegetación natural para sembrar especies generalmente introducidas.	
	Agricultura de riego	Labranza generalmente mecanizada; riego por gravedad, menos frecuentemente por aspersión y algunos otros métodos más tecnificados. Uno a dos ciclos al año.
	Agricultura de temporal	Labranza mecanizada o con tracción animal, en terrenos generalmente con cierta pendiente, algunas pedregosas o bien con alguna otra condición que impiden o dificulta el riego. Un solo ciclo al año. Poca tecnificación y uso de abonos químicos, herbicidas, etc.

Tabla 2. Uso de suelo para matorral

Uso de suelo o vegetación actual	Clase de uso de suelo	Descripción
Matorral	Vegetación principalmente arbustiva, con elementos de hasta unos 5 m. de altura, que no alcanza la estatura de árboles. En la zona todos los matorrales incluyen especies de cactáceas y leguminosas propias de la zona árida de México. En la región se aprovechan fundamente para la ganadería extensiva de especies menores o vacunas, y la extracción de productos como la leña, frutos y otras partes de plantas, principalmente para el autoconsumo.	

Uso de suelo o vegetación actual	Clase de uso de suelo	Descripción
	Matorral subtropical	Matorral con estrato arbustivo más alto de alrededor de los 4 m, en el que dominan especies no espinosas, algunas de ellas propias de las selvas secas. El casahate (Ipomea murucoides)
	Matorral crasicaule	Matorral dominado por especies de cactáceas. En la región están representados por asociaciones de garambullo (Mirtyllocactus geometrians), nopalera y otras opuntias; pitayos (Stenocereus Querétaro ensis y S. Dumortieri), junto con acacias, uñas de gato (Mimosa sp.), sangregao y otras especies propias de los matorrales xerófitos. En la zona está íntimamente relacionado con los matorrales subtropicales y probablemente se trate de una condición secundaria.

Tabla 3. Uso de suelo para pastizal

Uso de suelo o vegetación actual	Clase de uso de suelo	Descripción
Pastizal	Vegetación dominado por gramíneas herbáceas, aunque puede presentar algunos otros elementos herbáceos, arbustivos y aún algunos árboles. En la región se aprovecha prácticamente en su totalidad para la ganadería extensiva.	
	Pastizal inducido	La mayoría de los pastizales de los municipios estudiados son de este tipo y derivados de la sustitución de matorrales para su aprovechamiento pecuario. Algunos otros son resultado del abandono de áreas agrícolas de temporal en los últimos años. Dominan en estas asociaciones pastos de los géneros Aristida, Bouteloua, Erioneuron, Lycurus y Setaria.
	Pastizal natural	Los pastizales naturales en la zona (de acuerdo a Zamudio et. Al.) se encuentran en pequeñas áreas en la vecindad de La Laborcilla, al norte del municipio de El Marqués y están compuestos por especies de los géneros Andropogon, Bouteloua y

Uso de suelo o vegetación actual	Clase de uso de suelo	Descripción
		Muhlenbergia

Tabla 4. Uso de suelo para bosque

Bosques templados	Vegetación dominantemente arbórea, propia de climas templados, en la que dominan bien especies de encinos o robles (Quercus spp.), pinos u otras coníferas o asociaciones de ambos tipos de árboles.	
	Bosque de encino	Bosque dominado por especies de encino (Quercus spp). En el norte de los municipios de Querétaro y el Marqués se encuentran asociaciones de Q. Grisea, Q. Potosina y Q. Eduardi.

Tabla 5. Uso de suelo urbano, erosión, industrial y áreas abiertas

Urbano	Zonas con dominancias de áreas construidas que abarca las localidades de superficie mínima de unas 30 ha. (un cuadrado de poco más de 2.5 mm de lado, aprox., a la escala 1.250,000).	
Erosión	Suelo desnudo sin presencia de cobertura vegetal. Incluye zonas erosionadas por la actividad humana y afloramientos naturales.	
Industrial	Parques industriales y algunas instalaciones de instituciones de investigación, servicios, cuando están aisladas o asociadas a las primeras.	
Áreas abiertas	Cuerpos de agua	Presas y bordos
	Áreas, granjas y establos.	Grandes instalaciones (más de 30 Ha continuas) para la cría de ganado, principalmente avícolas.

El uso potencial se refiere a un sinónimo de posibilidad de aprovechamiento de todas las condiciones que se encuentran presentes en una zona de la superficie terrestre, como son el

clima, relieve, suelo, vegetación, uso y otros factores presentes en una zona de la superficie terrestre, todo este conjunto de factores son conocidos como terrenos o tierras.

Para conocer el uso óptimo de un terreno se evalúan una serie de posibilidades diversas de aprovechamiento y además los riesgos de deterioro. El cambio de uso de suelo es un proceso inducido por el hombre, debido principalmente a la expansión demográfica y a la explotación de los recursos naturales para satisfacer la demanda de una mayor producción de alimentos, bienes y servicios.

Sin embargo, este tipo de decisiones traen consigo efectos adversos que impactan directamente a la población; en particular, los cambios de uso de suelo tienen un efecto directo en la producción de escurrimientos superficiales y subsuperficiales, así como en la infiltración del agua en el suelo, pudiendo provocar como respuesta avenidas rápidas e inundaciones.

Por otra parte, los volúmenes que anteriormente eran retenidos por la cuenca hidrológica (evaporación, transpiración y percolación), ahora son trasladados por escurrimiento superficial por el sistema de canalizaciones (naturales y artificiales) hacia la salida de la cuenca, en donde estos faltantes en los volúmenes anuales, significan la necesidad de analizar los nuevos balances anuales que permitan mitigar los déficit provocados por el cambio acelerado en los usos de suelo.

- ***Procesos de cambio en el uso del suelo***

De los diferentes procesos que determinan el cambio en el uso del suelo algunos han recibido especial atención, como el caso de la deforestación, que es el cambio de una cubierta forestal o dominada por árboles hacia una que carece de ellos. La alteración (también llamada degradación) implica una modificación inducida por el hombre en la vegetación natural, pero no un remplazo total de la misma, como en el caso de la deforestación. La fragmentación es la transformación del paisaje dejando oquedades de vegetación original rodeados de superficie alterada.

El suelo es un ente de la Naturaleza, cuyas características son el resultado de una larga evolución hasta alcanzar un equilibrio con las condiciones naturales. Es importante tener en consideración que en esas condiciones ambientales no está incluida la acción de las

civilizaciones humanas que generalmente tiene además de las modificaciones a la estructura superficial terrestre, trae afectaciones como contaminación en general.

El suelo es un componente del medio natural y como tal debe ser considerado en sus condiciones naturales, en donde la cobertura vegetal lo protege de la intemperización y erosión. Las continuas modificaciones al ambiente y la sobreutilización de los recursos naturales por parte del hombre, han truncado la permanencia de la cubierta natural y han condicionado negativamente sus propiedades físico-químicas. Como resultado el suelo se deteriora y degrada continuamente. Se considera como degradación del suelo a toda modificación que conduzca al deterioro de este.

Según la FAO - UNESCO la degradación es el proceso que rebaja la capacidad actual y potencial del suelo para producir, cuantitativa y cualitativamente, bienes y servicios.

La degradación del suelo es la consecuencia directa de la utilización del suelo por el hombre. Bien como resultado de actuaciones directas, como agrícola, forestal, ganadera, agroquímicos y riego, o por acciones indirectas, como son las actividades industriales, eliminación de residuos, transporte, etc.

Actualmente existe una fuerte tendencia cuyo propósito es la utilización racional del suelo. Sus principios se agrupan en lo que se conoce por Conservación de Suelos. Las teorías conservacionistas persiguen obtener máximos rendimientos pero con mínima degradación.

El cuidado del suelo es esencial para la supervivencia de la raza humana. El suelo produce la mayor parte de los alimentos necesarios, fibras y madera. Y sin embargo, en muchas partes del mundo, el suelo ha sido afectado significativamente por un manejo irracional en donde es poco probable la producción de bienes (FAO, 1976).

- ***Deforestación***

El principal motivo de preocupación mundial en torno a la deforestación se refiere al calentamiento global y a la pérdida de los servicios ambientales que prestan los bosques y selvas. Los bosques proporcionan servicios de gran importancia: forman y retienen los suelos en terrenos con declive evitando la erosión; favorecen la infiltración de agua al subsuelo alimentando los mantos freáticos y también purifican el agua y la atmósfera.

Estimaciones recientes muestran que los bosques del planeta almacenan unas 280 gigatoneladas de carbono en la biomasa de los árboles (FAO, 2005). Este mismo trabajo señala que la suma total del carbono retenido en la biomasa forestal, en los árboles muertos, la hojarasca y el suelo, supera en alrededor de 50% la cantidad total de carbono contenido en la atmósfera (FAO, 2005). Al emplear el fuego para eliminar la cubierta forestal, ese carbono es liberado a la atmósfera donde contribuye al efecto invernadero.

Los procesos que promueven el cambio de uso del suelo afectan de manera distinta la cubierta vegetal del país. De acuerdo a los cambios observados entre 1993 y el año 2002, su alteración (es decir, el cambio de una cobertura de tipo primario a una secundaria) fue mayor en los bosques mesófilos de montaña, seguidos por las selvas, bosques y matorrales. La agricultura y la ganadería ganaron una mayor superficie a los distintos tipos de vegetación vía las cubiertas secundarias que por la remoción de las cubiertas no alteradas. Comparativamente con la ganadería, la agricultura fue, en todos los casos, la mayor responsable del cambio de uso del suelo en el país [2].

Con el presente documento se cuenta con las condiciones para determinar la evolución que se ha tenido en el uso de suelo de la cuenca del río Querétaro, en los últimos 30 años y se determina la evolución del uso de suelo, especialmente la evolución de la traza urbana. Con los resultados obtenidos, se analizó la potencialidad de los escurrimientos superficiales en la zona de descarga de la cuenca y la forma en que se ha incrementado la respuesta de la cuenca hidrológica del río Querétaro, hecho que afecta invariablemente los costos relacionados con las obras hidráulicas que cada vez serán de mayores requerimientos y especificaciones de construcción ante las mayores eventualidades hidrológicas.

- ***Escurrimiento***

Por medio de los modelos digitales de terreno de la cuenca, se determinarán los caminos del agua hasta la salida de la cuenca por medio del programa SHETRAN y apoyado por un gestor de información geográfica como puede ser ARCMAP Versión 9 o posterior.

Los tipos de escurrimiento pueden ser:

- **Superficial**, parte de la precipitación, que no se infiltró, entra directamente en movimiento sobre la superficie del suelo y la red de drenaje de la cuenca.

- **Sub-superficial**, parte de la precipitación que si se infiltró, pero tiene movimiento lateral sobre el horizonte, este efecto puede ser mediato o retardado, cabe destacar que las características del suelo son fundamentales. Una parte fluye a la superficie otra se percola.

- **Subterráneo**, proviene de las profundidades mayores al nivel freático, es producto de la precipitación infiltrada a través del suelo una vez que se ha saturado, el proceso ocupa largos periodos de tiempo [4].

Para efectos de este trabajo se utilizará un modelo de lluvia escurrimiento, por medio de registros de precipitación y de los parámetros de la cuenca como son vegetación, uso de suelo, edafología y evaporación potencial para la cuenca del río Querétaro.

En la Figura 7 se muestra una sección transversal en donde se aprecian los tiempos del ciclo de agua también como se presentan los tipos de escurrimiento durante este proceso.

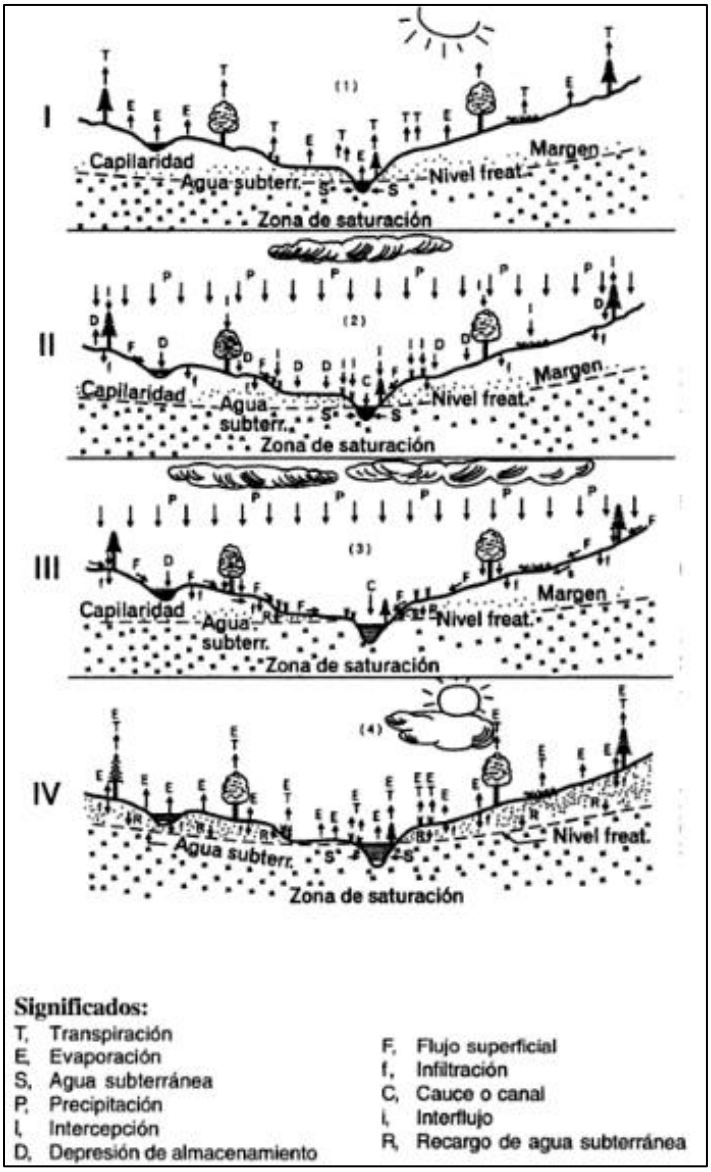


Figura 7. Sección transversal ideal de un valle mostrando, en orden de sucesión, los tiempos del ciclo de agua de escurrimiento [8].

- *Evaporación.*

La evaporación podrá será calculada a través del modelo de simulación y será comparada con información de investigaciones realizadas en la cuenca del río Querétaro o por medio de los registros de las instancias oficiales. Para efectos de comparar el potencial de los escurrimientos de la cuenca, en el cálculo de la escorrentía de la cuenca, se consideró la

evaporación y la transpiración como las condiciones de clasificación de uso de suelo y el cambio en el periodo citado de 30 años [4].

Dentro de la Figura 8 se aprecian como la evaporación se puede presentar al momento de la precipitación, en la transpiración, y por supuesto ya cuando se encuentra en los cuerpos receptores, como conductos o almacenamientos superficiales.

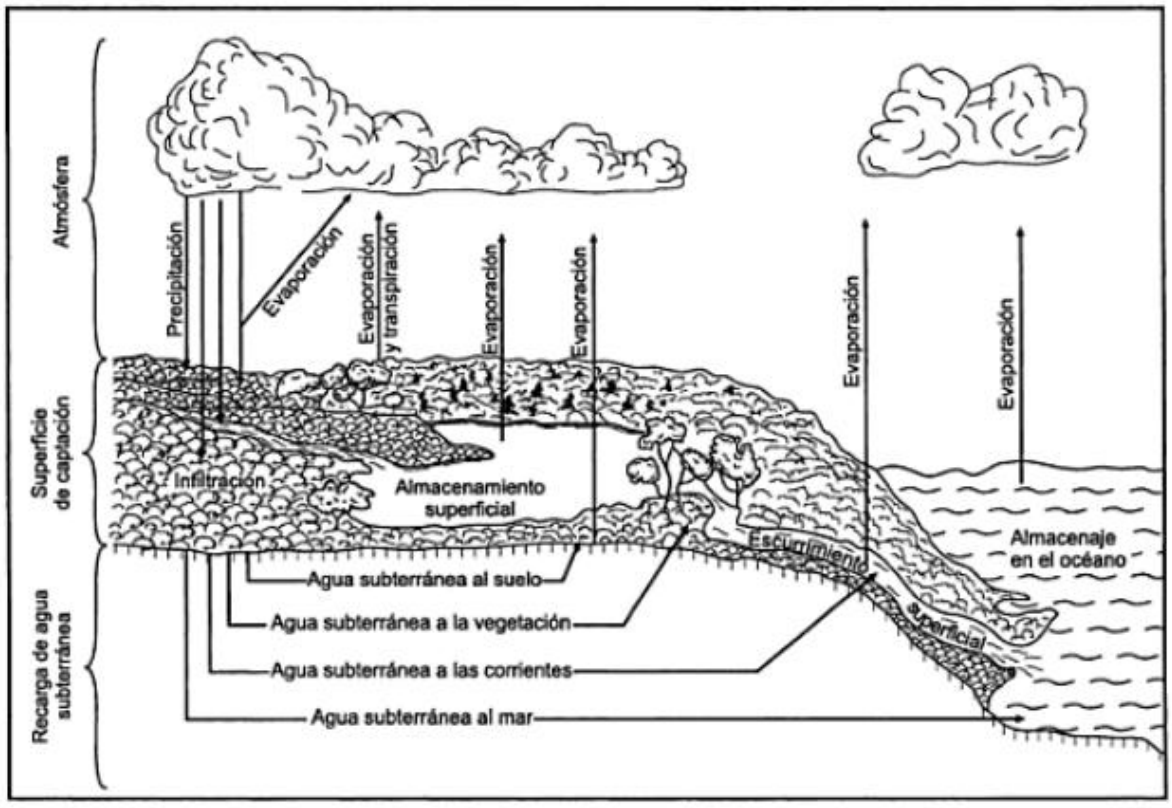


Figura 8. Ciclo hidrológico [9]

- ***Normatividad***

De acuerdo a la ley "QUE REFORMA, ADICIONA Y DEROGA DIVERSAS DISPOSICIONES DE LA LEY DE PROTECCIÓN AMBIENTAL PARA EL DESARROLLO SUSTENTABLE DEL ESTADO DE QUERÉTARO" en la Sección Tercera De la regulación ambiental de los asentamiento humanos en los Siguientes artículos:

Artículo 46.

La regulación ambiental de los asentamientos humanos, consiste en el conjunto de normas, disposiciones, criterios, lineamientos y medidas de desarrollo urbano, social y vivienda que llevan a cabo el Poder Ejecutivo del Estado, los gobiernos municipales y particulares, para dar respuesta oportuna y eficaz a los desafíos de competitividad, equidad, y sustentabilidad por medio de la gestión de los asentamientos, cuyo objetivo es reducir la huella ecológica, mejorar los resultados medioambientales y la calidad del entorno en las zonas urbanas, y garantizar un medio de vida sano para los ciudadanos urbanos y rurales, reforzando la contribución del medio ambiente al desarrollo urbano sostenible.

Artículo 47.

Para la regulación ambiental en los asentamientos humanos que se ubiquen en el Estado de Querétaro, las dependencias y entidades del Poder Ejecutivo del Estado y los municipios, considerarán los siguientes Criterios:

I. La política ambiental en los asentamientos humanos requiere de una estrecha vinculación con el desarrollo social, la planeación urbana y con el diseño y construcción de la vivienda;

II. La política ambiental debe buscar reducir al máximo los impactos negativos y desequilibrios de los ciclos ecológicos y que deterioran la calidad de vida de la población y, a la vez, prever las tendencias de crecimiento del asentamiento humano, orientándolo hacia zonas aptas para este uso que no representen riesgos, para mantener una relación suficiente entre la base de recursos, las áreas verdes y la población;

III. La regulación ambiental observará los criterios de conservación en:

Se prohíbe el establecimiento de asentamientos humanos en áreas naturales protegidas, zonas de preservación ecológica y suelos con alta fertilidad agrícola.

Promover e impulsar el establecimiento de áreas verdes con el propósito de alcanzar una superficie mínima de 10 m2 /hab.

Promover e impulsar la preservación de la salud del arbolado urbano con el propósito de reducir la pérdida de áreas verdes y prevenir riesgos de caída y muerte prematura.

Promover e impulsar la plantación de especies nativas en áreas verdes y arbolado urbano;

IV. La regulación ambiental observará los criterios de protección en:

Permitir la construcción de vivienda y espacios públicos en sitios sin presencia de riesgos naturales o aquellos que no hayan sido modificados por la actividad del hombre: terrenos que no hayan sido rellenados con materiales no consolidados, bancos de material y zonas con mantos acuíferos sobrexplotados.

Llevar a cabo una planificación descentralizada de los servicios y equipamientos básicos de tal manera que se tienda asegurar una igualdad de oportunidades en el acceso de estos bienes en todo el territorio.

Con el fin de impulsar una renovación urbana favorecer la reposición habitacional a partir del mejoramiento, saneamiento y rehabilitación de sus elementos (vialidad, redes de servicio o del paisaje urbano) y limitando en las zonas predominantemente habitacionales de la ciudad el cambio de uso del suelo de residencial a industrial, de conformidad con los programas de desarrollo urbano aplicables y las disposiciones del Código Urbano del Estado de Querétaro.

No permitir la construcción de vivienda y espacios públicos, en zonas de influencia de instalaciones que puedan representar una amenaza químico-tecnológica.

Promover e impulsar que las construcciones en zonas sísmicas cumplan con criterios de construcción antisísmicos establecidos en la normatividad.

En la determinación de áreas para el desarrollo de actividades altamente riesgosas, se dispondrá la inserción de zonas intermedias de salvaguarda de cuando menos 350 metros, en las cuales se prohíba el uso habitacional, comercial u otro que ponga en riesgo a la población de conformidad con los programas de desarrollo urbano aplicables y las disposiciones del Código Urbano del Estado de Querétaro.

Eficientar el sistema de recolecta y disposición de residuos sólidos municipales con el fin de evitar la práctica de quema de residuos en zonas urbanas propicias a emergencias por contaminación atmosférica.

Promover e impulsar la preservación, recuperación y aprovechamiento del patrimonio arquitectónico e histórico.

Impulsar un sistema de ciudades para la articulación regional evitando la progresiva desarticulación y el despoblamiento de las áreas rurales interiores; y

V. La regulación ambiental observará los criterios de aprovechamiento en:

Privilegiar el establecimiento de sistemas de transporte colectivo y otros medios de alta eficiencia energética y ambiental.

2.3 Percepción remota

La Percepción remota es la ciencia y arte de obtener información de un objeto, área o fenómeno a través del análisis de los datos adquiridos mediante algún dispositivo que no está en contacto físico con el objeto, área o fenómeno investigados.

La Percepción Remota involucra dos procesos básicos:

Adquisición de datos desde plataformas con sensores adecuados Análisis de los datos mediante dispositivos visuales o digitales Muchas veces la información así adquirida se complementa con datos de referencia ya existentes de la región en estudio (mapas de suelos, estadísticas de cosechas, planos catastrales, etc.)

Toda esta información es usualmente combinada en forma de capas de información en lo que usualmente se denomina un SIG (Sistema de Información Geográfico) o GIS de acuerdo a sus siglas en inglés.

Hemos visto cómo las radiaciones electromagnéticas, fundamentalmente emitidas por el sol y reflejadas por los objetos terrestres, o incluso emitidas por dichos objetos (p.ej. en el infrarrojo térmico), todas más o menos afectadas por efectos atmosféricos, se combinan generando "señales" de las cuales es posible extraer información acerca de dichos objetos y de las coberturas terrestres.

La detección de tales señales electromagnéticas puede efectuarse por medios fotográficos o electrónicos. Históricamente fueron la placa o el film fotográfico, usualmente sobre

plataformas aéreas, los sensores remotos por excelencia. Estos, a partir de las últimas décadas, coincidieron con los sensores electrónicos, más adecuados para las exigencias a que son sometidos sobre plataformas suborbitales y satelitales.

La detección sobre plataformas aéreas, sea con sensores fotográficos o electrónicos sigue constituyendo una valiosa fuente de información en un amplio rango de aplicaciones, y la decisión final sobre el uso de tal o cual tipo de plataforma debe ser cuidadosamente analizada, particularmente cuando la relación costo/beneficio gravita sensiblemente sobre el presupuesto de un proyecto. Fue a partir de la década del 60 que comenzó el desarrollo vertiginoso de la percepción remota desde plataformas satelitales.

Distintos factores han condicionado este comportamiento que ha ido llevando a la percepción remota satelital a una etapa esencialmente comercial. El más importante de dichos factores fue seguramente la liberación para aplicaciones civiles al fin de la Guerra Fría de tecnología reservada hasta entonces para uso militar.

Hasta 1946 la observación terrestre por percepción remota se efectuaba desde aviones o globos. En 1946 se adquirieron las primeras fotografías desde cohetes V2 capturados a los alemanes, siendo estas experiencias decisivas para ilustrar el potencial de la fotografía desde alturas orbitales. Este potencial se volvió más evidente con las misiones orbitales y espaciales a partir de la década del 60: uno de ellos fue el proyecto CORONA de espionaje militar.

Un número no determinado de estos satélites de corta vida (1 a 16 días) orbitando a unos 130 km de altura y utilizando cámaras fotográficas de alta resolución realizó misiones de espionaje entre los años 1960 y 1972. El material fotográfico obtenido fue desclasificado en 1995.

En la Figura 9 se observa una imagen de las ciudades de Artigas y Quarai obtenida en el año 1965 por un Satélite Corona.

Figura 9. Primeras imágenes del satélite Corona. Se aprecia poca resolución en los atributos e imagen monocromática.

Sin embargo, el año 1972 marca un hito en el avance de la percepción remota satelital con el lanzamiento, por parte de los Estados Unidos, del primero de una serie de satélites ópticos especialmente destinados a monitorear los recursos terrestres. Dicha serie se llamó LANDSAT y actualmente operan Landsat-5 y Landsat-7, Figura 10, este último actualmente con serias dificultades en su sistema de barrido constituyendo un obstáculo para muchas de sus aplicaciones. Por su parte Francia, con la participación de Suecia y Bélgica, lanzó en 1986 el primer satélite de la serie SPOT (Systeme Pour l'Observation de la Terre) de la cual operan actualmente los Spot -2, -4 y –5.

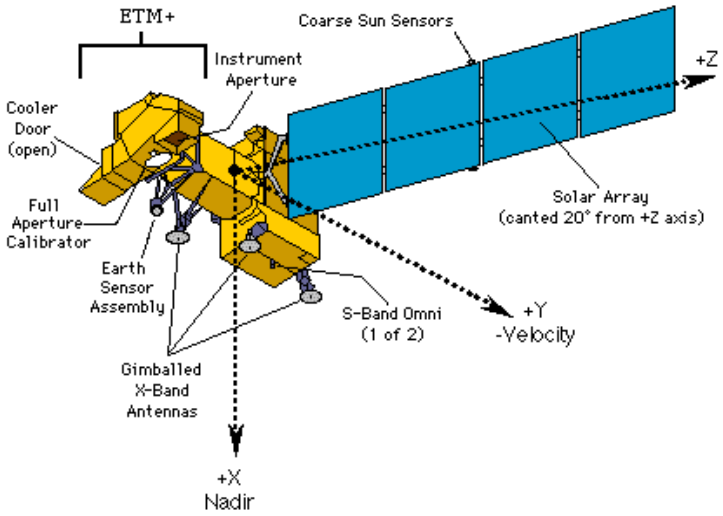


Figura 10. Satélite Landsat [10]

Figura 11. Satélite de la serie SPOT. [10]

En los últimos años se han puesto en órbita satélites comerciales de alta resolución espacial como el Ikonos el Quickbird y el Orbview-3. Las órbitas de estos satélites son más bajas (680 y 450 km) y sus resoluciones espaciales alcanzan a 1 m y 0.6m la Figura 12 permite apreciar visualmente en imágenes de un cultivo agrícola el efecto de la resolución espacial.

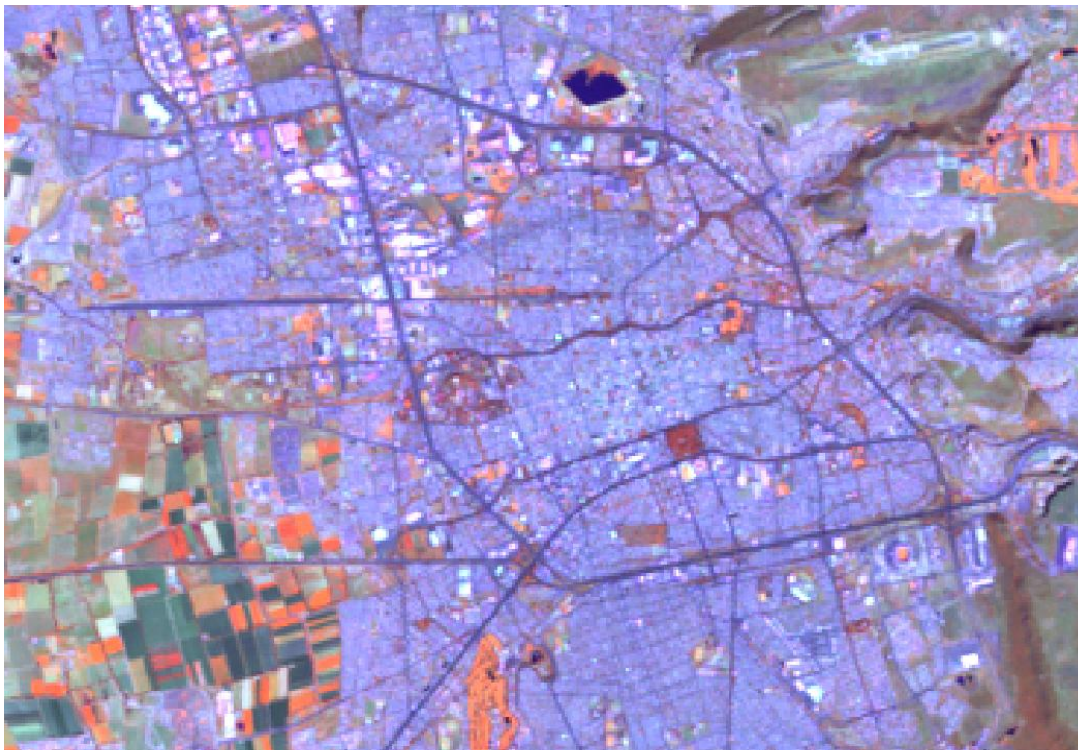


Figura 12. Resolución espacial de satélites actuales, donde se puede apreciar con mayor precisión las tonalidades en color verdadero de la imagen.

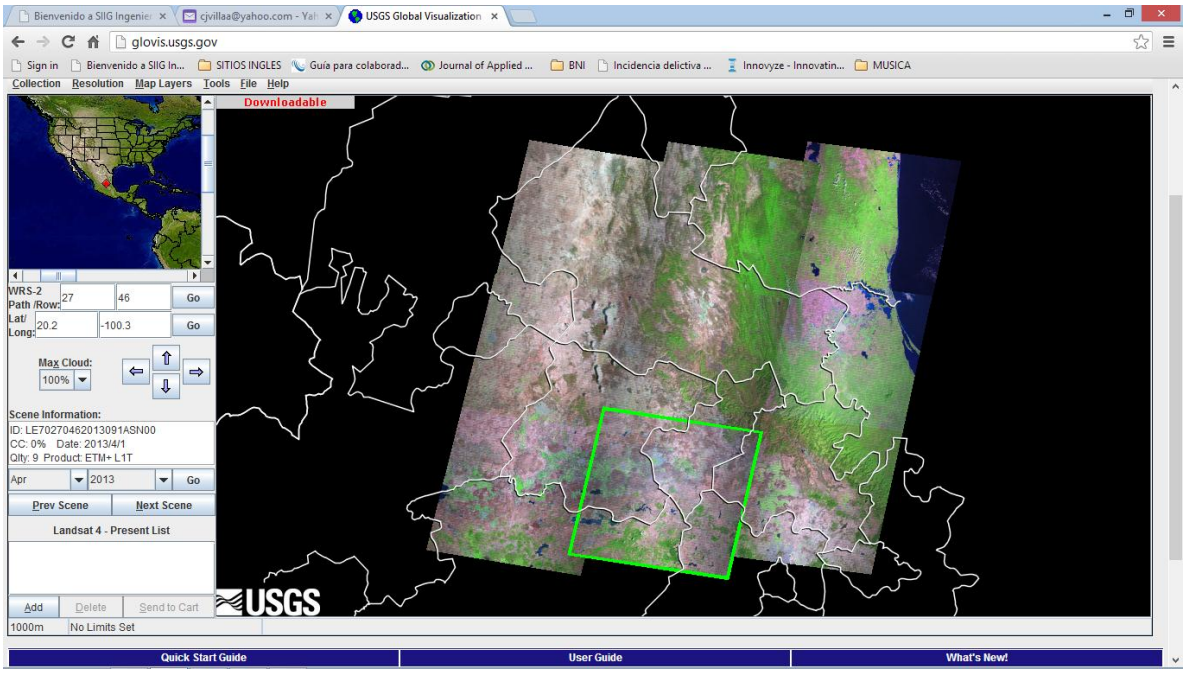


Figura 13. Página de donde se pueden obtener las imágenes satelitales, donde se aprecia la ubicación de y tamaño de la imagen dentro del estado de Querétaro. [11]

La urbanización de las cuencas es un proceso que afecta rápida y crecientemente a las ciudades en general. La urbanización modifica los componentes del ciclo hidrológico, en especial los volúmenes de agua que escurren o anegan la superficie de los suelos durante la ocurrencia de episodios lluviosos.

Paralelamente, se vinculan dichos cambios con la presencia de riesgos naturales, principalmente inundaciones. Se constata que la superficie de las ciudades asentadas en las cuencas en estudio ha experimentado un acelerado proceso de crecimiento que se traduce en un marcado incremento de las áreas urbanas en desmedro de otros usos y coberturas naturales de los suelos, y en importantes modificaciones en componentes espaciales del ciclo hidrológicos, tales como incrementos en los coeficientes de escorrentía y cambios en la geometría y densidad del drenaje.

Finalmente, se observa una mayor extensión e incorporación de nuevas áreas afectas a riesgos de inundación fluvial, que pueden ser directamente relacionados con la urbanización.

CAPÍTULO 3

3 METODOLOGÍA

3.1 Cartografía satelital

3.1.1 Tipo de imágenes

Las imágenes LANDSAT 5 (TM), tienen captura de imágenes desde el año 1984 hasta la actualidad, el ancho de la escena es alrededor de 180 Km2 y posee 7 bandas espectrales:

- Banda 1 (Azul): Usada para el mapeo de aguas costeras, mapeo de tipo de forestación o agricultura y la identificación de los centros poblados.
- Banda 2 (Verde): Corresponde a la reflectancia del verde de la vegetación vigorosa o saludable. También es usada para la identificación de centros poblados.
- Banda 3 (Rojo): Es usada para la discriminación de especies de plantas, la determinación de límites de suelos y delineaciones geológicas así como modelos culturales.
- Banda 4 (Infrarrojo Reflectivo): Determina la cantidad de biomasa presente en un área, enfatiza el contraste de zonas de agua-tierra, suelo-vegetación.
- Banda 5 (Infrarrojo Medio): Es sensible a la cantidad de agua en las plantas. Usada en análisis de las mismas, tanto en época de sequía como cuando es saludable. También es una de las pocas bandas que pueden ser usadas para la discriminación de nubes, nieve y hielos.
- Banda 6 (Termal): Para la vegetación y detección de la vegetación que se encuentra enferma, intensidad de calor, aplicaciones de insecticidas, para localizar la polución termal, ubicar la actividad geotermal, actividad volcánica, etc.
- Banda 7 (Infrarrojo medio): Es importante para la discriminación de tipos de rocas y suelos, así como el contenido de humedad entre suelo y vegetación.

LANDSAT 7 (ETM), este sensor a diferencia del LANDSAT – TM, captura imágenes pancromáticas con 15 metros de resolución y dos imágenes termales en una, en ganancia baja y la otra en ganancia alta, cubren un área aproximada de 180 Km2. A partir del año

2003 LANDSAT – ETM tuvo problemas y a partir del 14 de julio del mismo año, las imágenes se colectan en modo SLC-off.

3.1.2 Combinación de bandas con LANDSAT

Las combinaciones de bandas más usadas es la siguiente:

Bandas 3, 2, 1 (RGB): Es una imagen de color natural. Refleja el área tal como la observa el ojo humano en una fotografía aérea a color.

Bandas 5, 4, 3 (RGB): En esta combinación la vegetación aparece en distintos tonos de color verde.

Bandas 4, 3, 2 (RGB): Tiene buena sensibilidad a la vegetación verde, la que aparece de color rojo, los bosques coníferos se ven de un color rojo más oscuro, los glaciares se ven de color blanco y el agua se ve de color oscuro debido a sus características de absorción.

Bandas 7, 4, 1 (RGB): Esta combinación de bandas es ampliamente utilizada en geología. Utiliza las tres bandas menos correlacionadas entre sí. La banda 7, en rojo, cubre el segmento del espectro electromagnético en el que los minerales arcillosos absorben, más que reflejar, la energía; la banda 4, en verde, cubre el segmento en el que la vegetación refleja fuertemente; y la banda 1, en azul, abarca el segmento en el cual los minerales con óxidos de hierro absorben energía.

Bandas 7, 4, 2 (RGB): Permite discriminar los tipos de rocas. Ayuda en la interpretación estructural de los complejos intrusivos asociados a los patrones vulcano-tectónicos.

Bandas 7, 3, 1 (RGB): Ayuda a diferenciar tipos de rocas, definir anomalías de color que generalmente son de color amarillo claro algo verdoso, la vegetación es verde oscuro a negro, los ríos son negros y con algunas coloraciones acules a celestes, los glaciares se ven celestes.

Para efectos del presente se llevará a cabo la utilización de cartografía de LandSat ETM7+ o disponible, de años representativos comprendidos en un periodo de por lo menos 30 años y espaciamientos regulares aproximados de cinco años.

Dentro de los anexos A y B se presentan las imágenes representativas para cada año dentro de la clasificación obtenida.

3.1.3 Identificación de usos de suelo

Se llevará a cabo la clasificación de usos de suelo por medio de la manipulación de las bandas visibles de satélite, por medio de un software informático (IDRISI, ARCMAP), con el cual se pueda determinar con un nivel de precisión adecuado los distintos usos de suelo de la cuenca de estudio.

3.1.3.1 Composición de imágenes RGB

Para la composición de imágenes se tiene que desplegar el menú de Tool Box, Figura 14

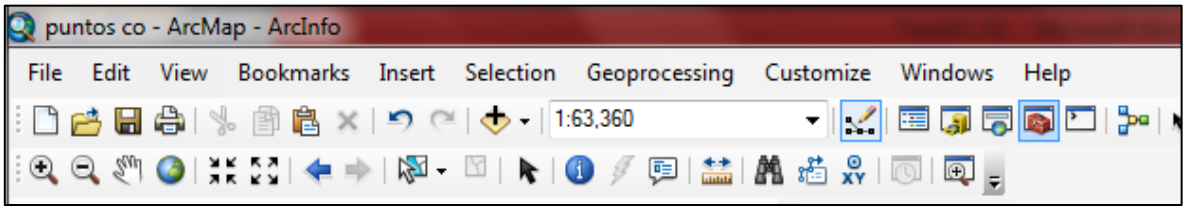


Figura 14. Barra de herramienta donde se encuentra la herramienta Tool Box

Dentro de la barra de Tool Box se tiene que elegir la opción de data Management Tools y dentro de esta seleccionamos la opción de Raster, ya estando dentro del menú de Raster escogemos la opción de Raster Processing, dentro de esta opción seleccionamos Composite Bands para poder procesar las imágenes y obtener una en color real.

Una vez teniendo esta imagen RGB podemos clasificar los diferentes tipos de suelo con dos herramientas, una es la clasificación no supervisada y la otra es la clasificación supervisada.

RGB (en Inglés **R**ed, **G**reen, **B**lue, en español rojo verde azul) es un modelo de color basado en la síntesis aditiva, con el que es posible representar un color mediante la mezcla por adición de los tres colores de luz primarios. El modelo de color RGB no define por sí mismo lo que significa exactamente rojo, verde o azul, por lo que los mismos valores RGB pueden mostrar colores notablemente diferentes en diferentes dispositivos que usen este modelo de color.

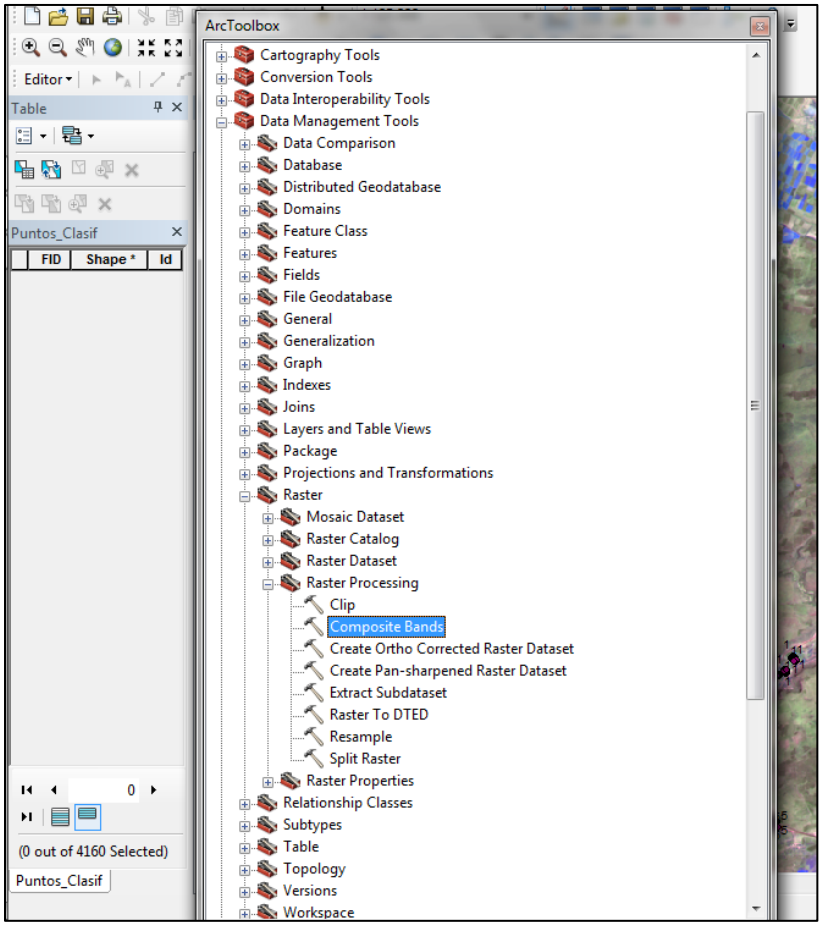


Figura 15. Opción Composite Bands

Una vez dentro de Composite Bands Figura 16 se escogen las imágenes en formato .tif las cuales son las imágenes 3, 4 y 5 ya que con estas se obtienen las imágenes más claras para distinguir los colores dentro de la imagen compuesta.

El formato *.TIFF es un formato de archivo de gráficos de mapa de bits el cual permite almacenar imágenes de mapa de bits muy grandes (más de 4 GB comprimidos) pero perdiendo calidad en estas.

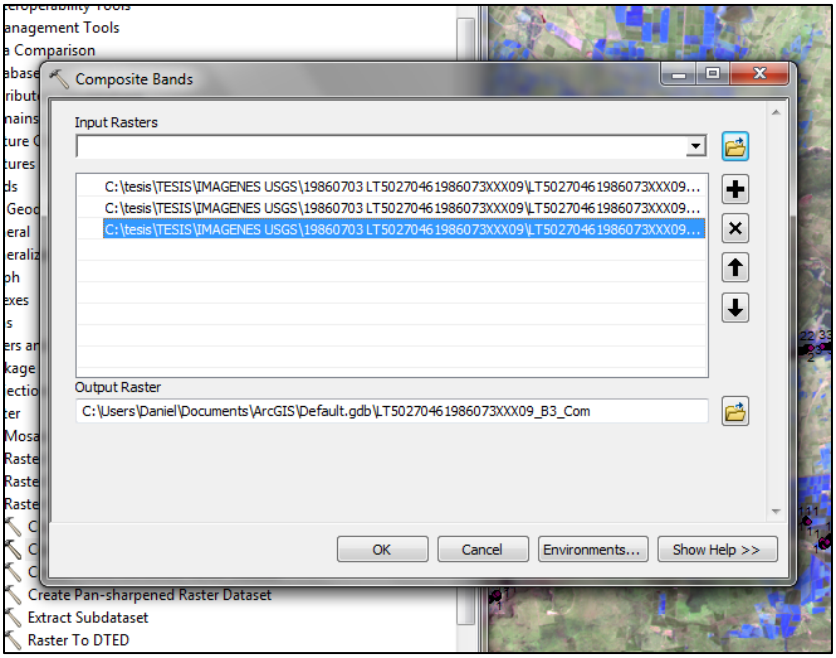


Figura 16. Selección de imágenes formato .tif

Ya compuesta la imagen se elige la combinación de colores en las cuales se pueda diferenciar de manera más fácil, los colores de esta y diferenciar los lugares de la imagen, se ha encontrado que la mejor combinación de imágenes es:

Red (C2), Green (C3), Blue (C1), Figura 17

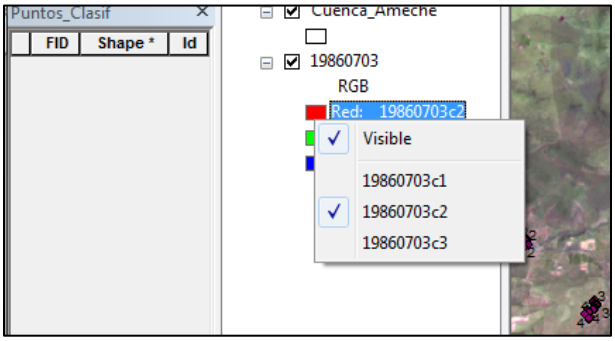


Figura 17. Posibles combinaciones de colores

Para la clasificación no supervisada la cual se encuentra dentro de esta ruta: *Arc Toolbox/Spatial Analyst Tools/Multivariate/ Iso Cluster Unsupervised Classification*, Figura 18, para esta clasificación se tiene que agregar la imagen ya compuesta y ya

agregada se eligen el número de clases deseadas, ya designados el número de clases el programa clasifica de acuerdo a los tonos de colores que se tengan en la imagen.

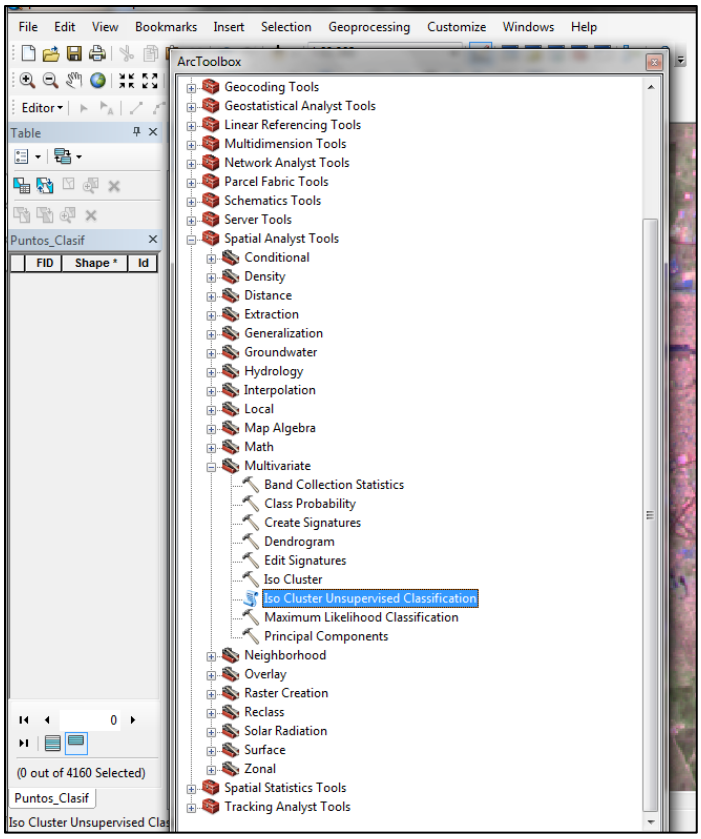


Figura 18. Opción para clasificación no supervisada

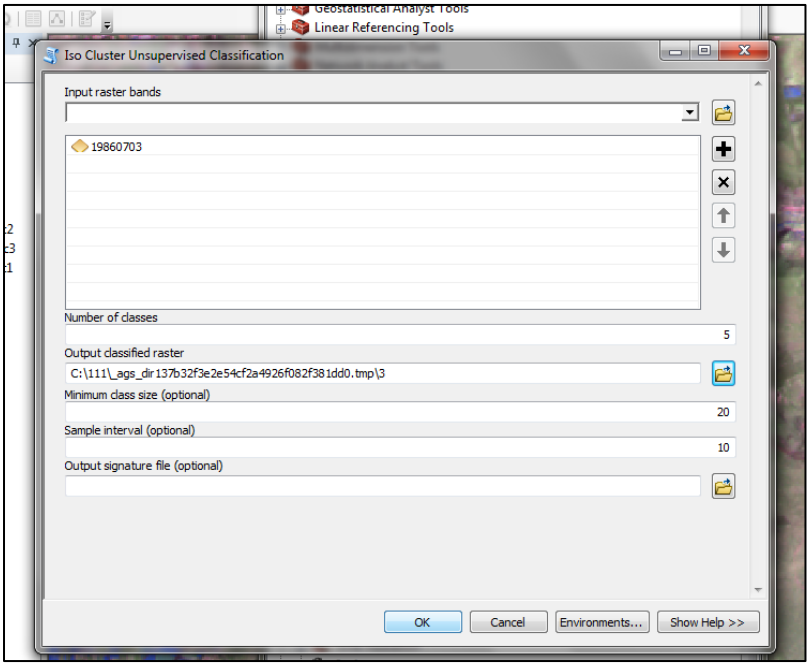


Figura 19. Clasificación no supervisada

Para la clasificación supervisada (Figura 20) se designan una serie de puntos sobre la imagen compuesta en color verdadero y estos puntos ahí que designares un número identificador, estos identificadores dependen del número de clases que se quieran obtener, después se sigue la siguiente ruta: *Arc Toolbox/Spatial Analyst Tools/Multivariate/ Create Signatures,* ya en la opción de *Create Signatures* ya asignados los identificadores a los puntos se clasifica la imagen y lo que hace el programa es buscar los pixeles que tengan un color similar o igual al de los puntos designados.

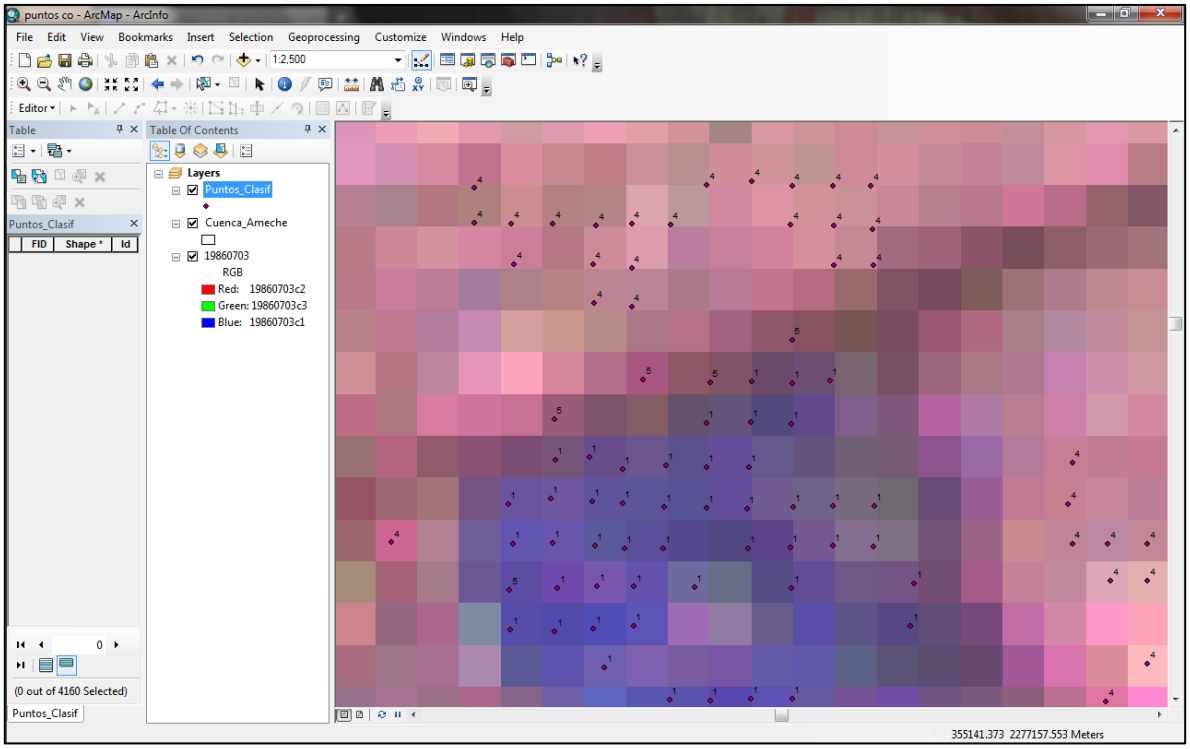


Figura 20. Designación de puntos

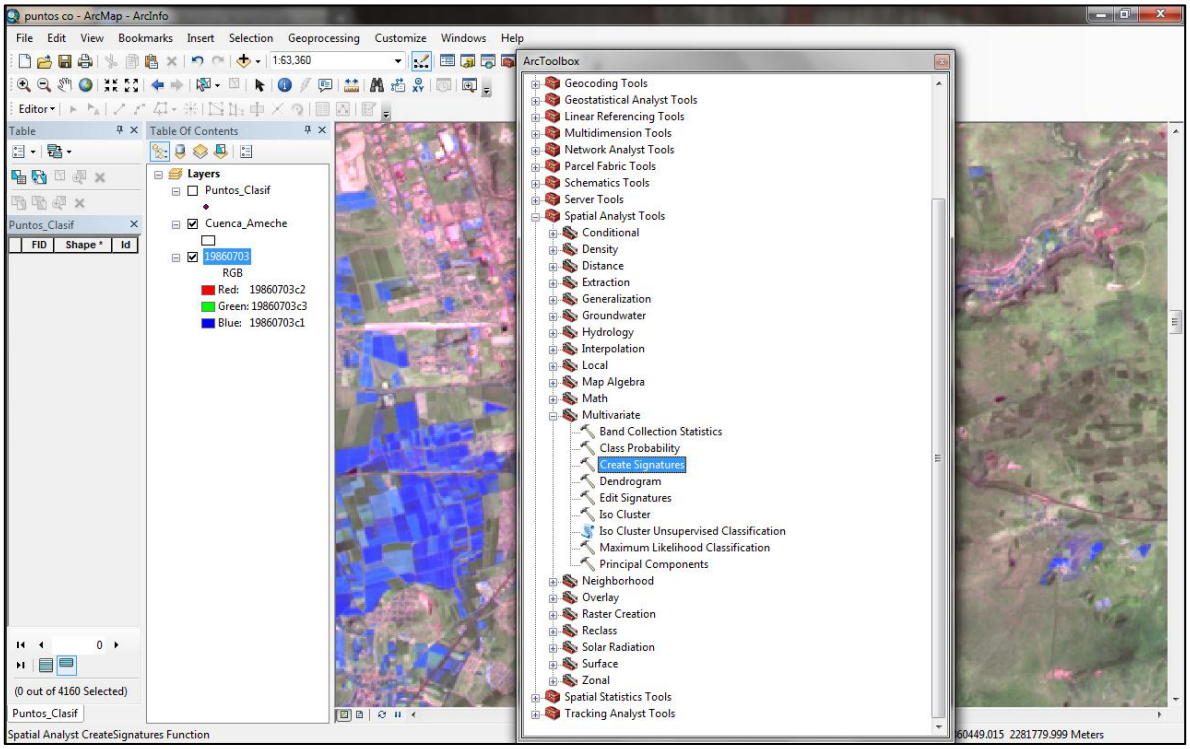


Figura 21. Opción para la clasificación supervisada

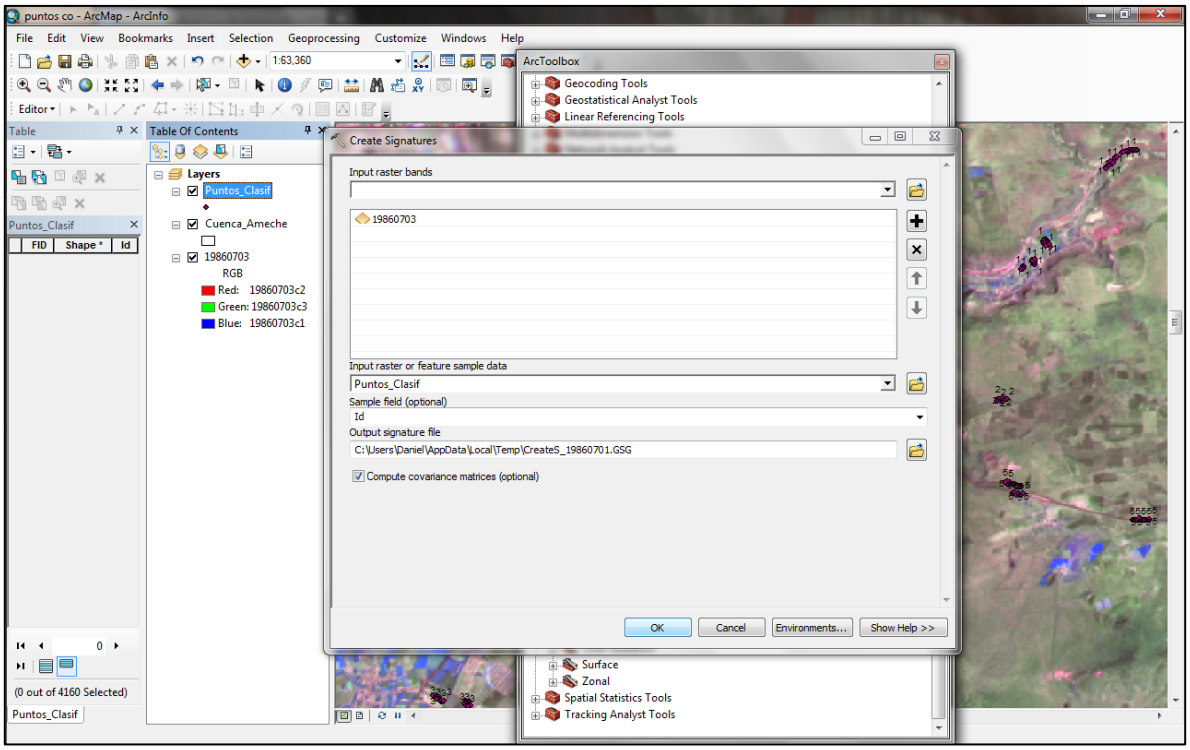


Figura 22. Datos necesarios para la clasificación supervisada

Ya que se requiere ser los más preciso en la clasificación se usara el tipo de clasificación supervisada, designando 5 tipos de clases:

Tabla 6. Clasificacion desigada para el estudio de uso de suelo

USO DE SUELO DE LA CUENCA	
	Vegetación (arbustos, matorral y bosque)
	Agua (cuerpos de agua)
	Suelo cultivable, tierras de cultivo
	Zona urbana, alterada
	Asfalto, zona industrial

Ya clasificada la imagen el siguiente paso es el extraer de la imagen satelital la cuenca para de esta forma contar los pixeles dentro de esta, para así graficar los cambios que se tuvieron dentro de los años en la cuenca.

Para la extracción de la cuenca se utiliza la siguiente ruta.

Data Management Tools/Raster/Raster Processing/Clip (Figura 23)

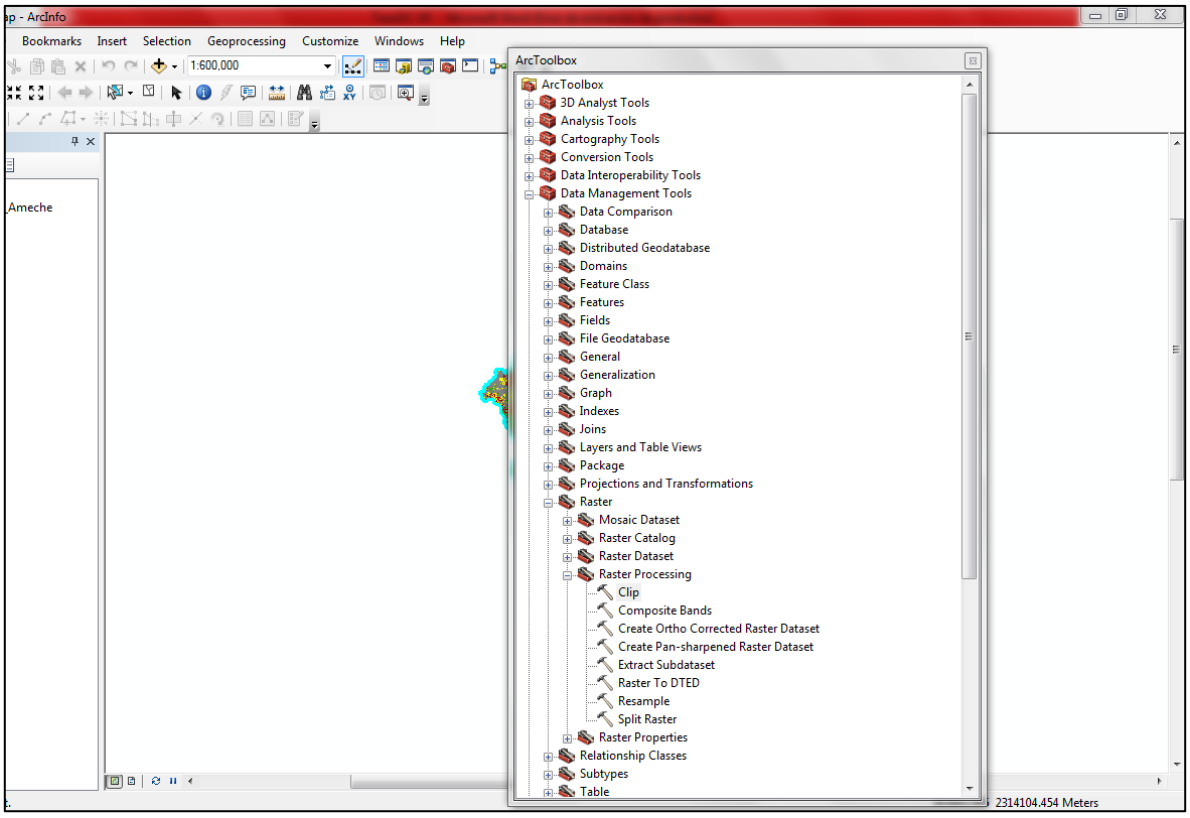


Figura 23. Ruta para la herramienta Clip

Se elige la opción clip y dentro de esta como primera opción (Input Raster) se elige la imagen satelital ya clasificada y como segunda opción (Output Extend) se elige la polilinea o el contorno de la cuenca para que de esta manera se tenga un recorte de la imagen original como se muestra en la Figura 24

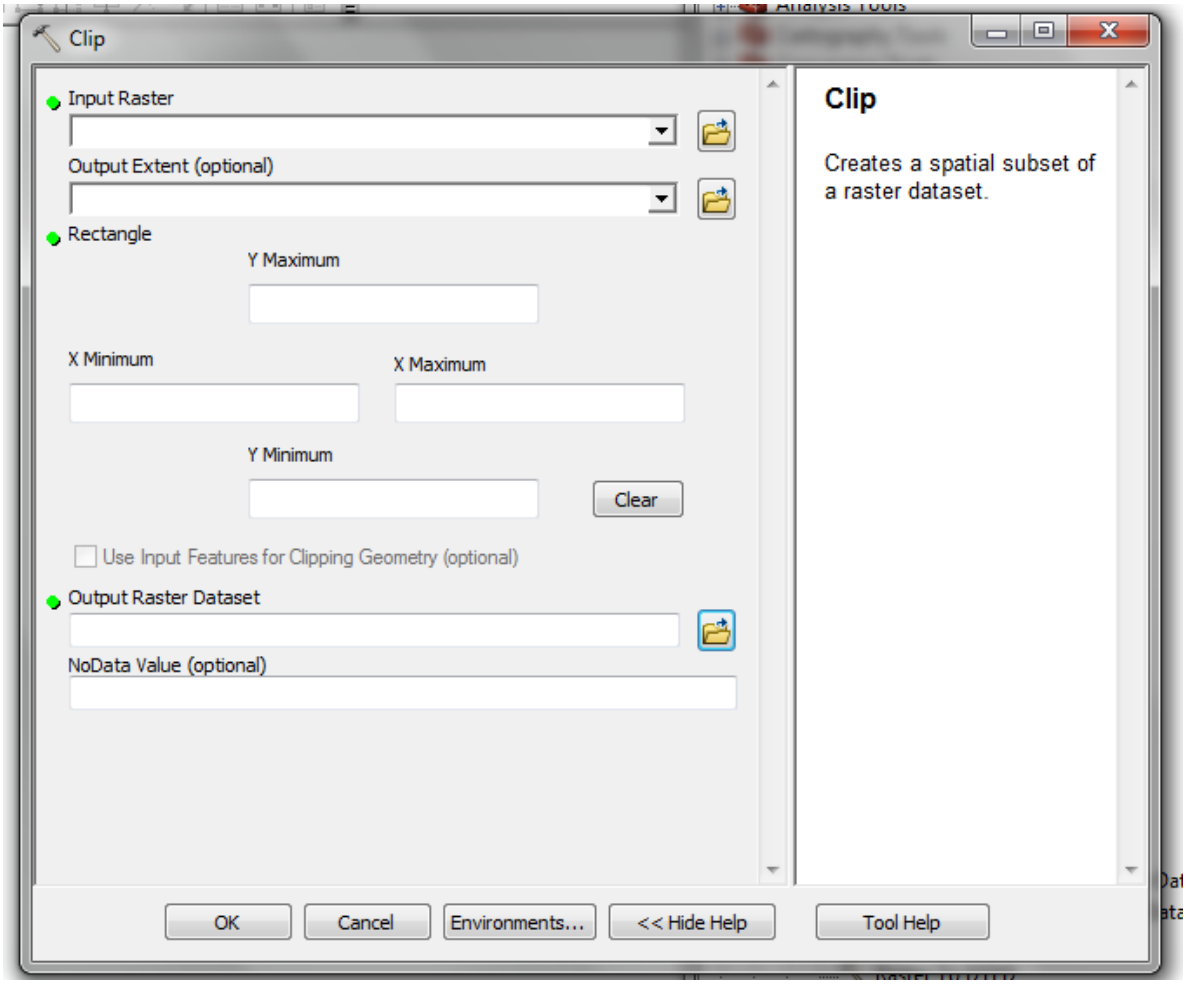


Figura 24. Herramienta para el recorte de imágenes

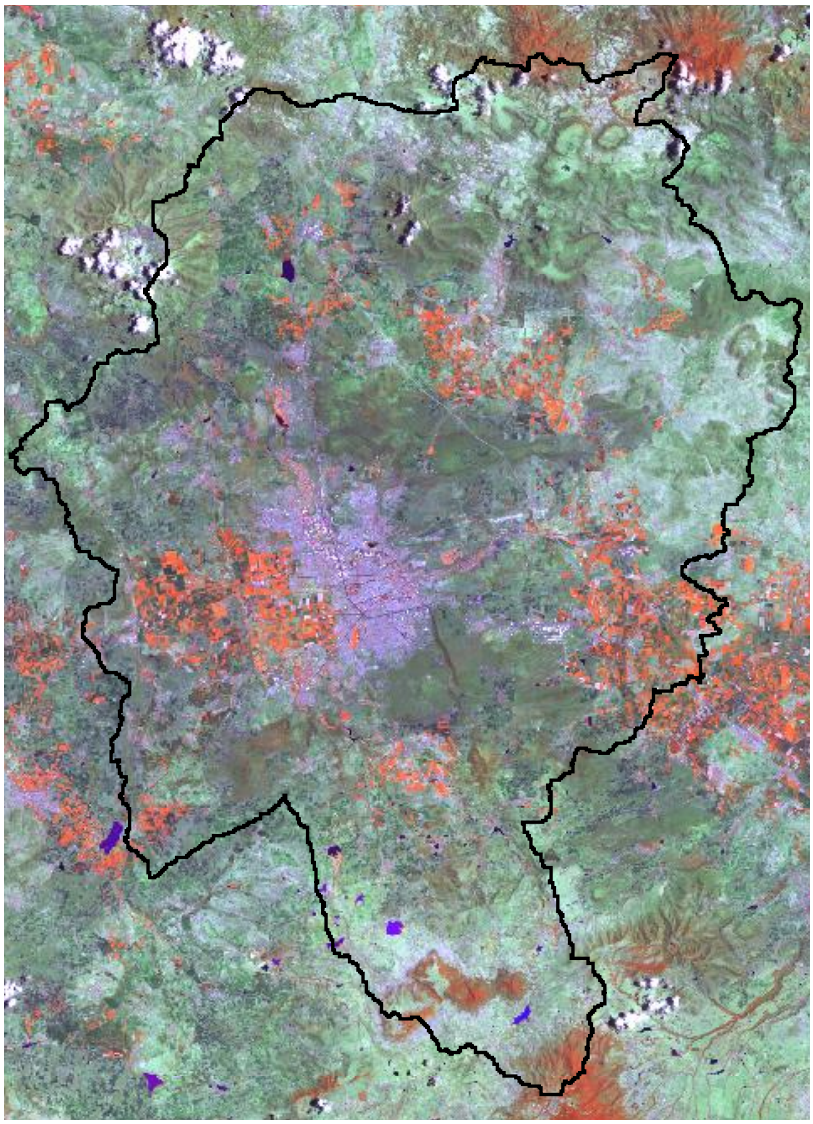


Figura 25. Recorte de imagen de satélite

Después de tener el primer recorte (Figura 25) se vuelve a elegir la opción de Clip para un nuevo recorte, en este segundo recorte se elige la imagen del primer recorte que se hizo anteriormente y se elige el área de la cuenca nuevamente para un segundo recorte.

El cual resulta como en la Figura 26.

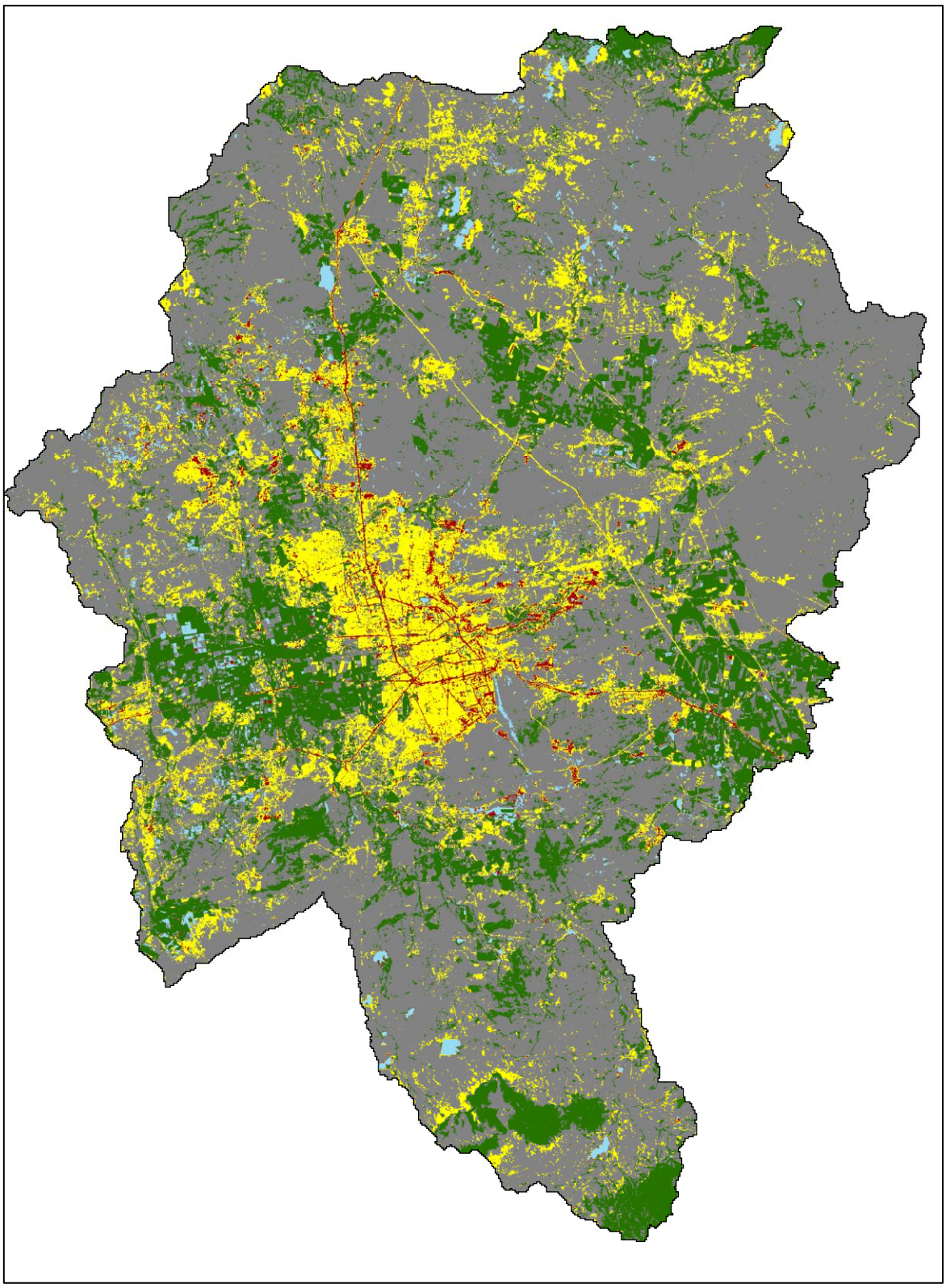


Figura 26. Recorte final de la imagen satelital.

Ya teniendo la imagen recortada con el área de la cuenca deseada se le da un clic derecho sobre la imagen ya recortada para de esta forma en las propiedades observar el número de pixeles que se obtuvieron para cada clasificación (Figura 27).

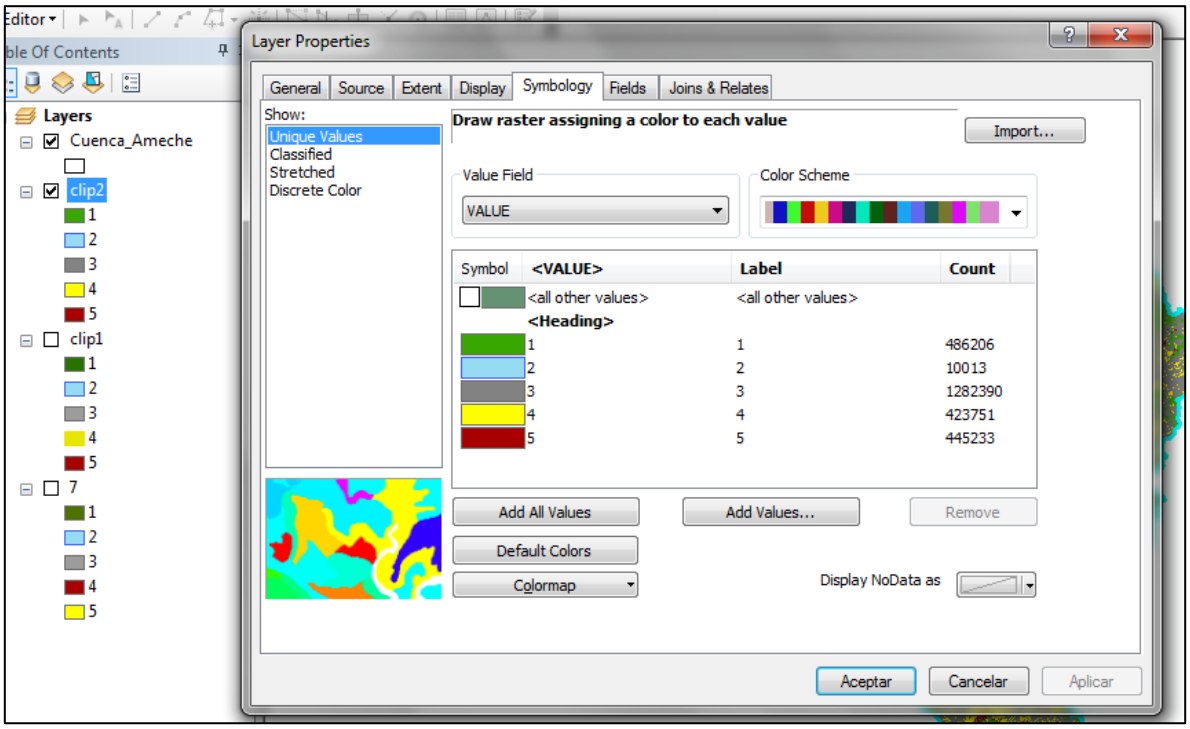


Figura 27. Valores de pixeles para cada clasificación.

Ya obtenida la clasificación de las diferentes imágenes al graficarlas se puede saber cómo es el comportamiento de estos pixeles a través del tiempo dado que se espera que al avanzar los años el área urbana se ha incrementado y el área verde vaya disminuyendo con la misma tendencia.

3.2 MODELO DE BASE FÍSICA

Los modelos hidrológicos son representaciones conceptuales simplificadas de una parte del ciclo hidrológico. Se usan principalmente para la predicción hidrológica y para entender los procesos hidrológicos. Hay dos tipos principales de modelos hidrológicos:

Modelos basados en datos

Estos modelos son sistemas de caja negra, que usan conceptos matemáticos y estadísticos para asociar una determinada entrada (por ejemplo, precipitación) con un modelo de salida (por ejemplo, escorrentía).

Las técnicas que suelen usarse son la regresión, funciones de transferencia, redes neurales e identificación de sistema. Estos modelos son conocidos como modelos de hidrología estocásticos.

Modelos basados en descripciones del proceso

Estos modelos tratan de representar los procesos físicos observados en el mundo real. Contienen representaciones de escorrentía superficial, flujo sub-superficial, evapotranspiración y flujo de canal, pero pueden ser mucho más complicados. Estos modelos son conocidos como modelos hidrológicos deterministas. Pueden subdividirse en modelos de un solo evento y modelos de simulación continua.

4 MODELOS HIDROLÓGICOS.

4.1 Tipos de modelos hidrológicos

Existen diferentes tipos de Modelos Hidrológicos. Pueden ser Determinísticos o Estocásticos, de Simulación o de Optimización.

Son ejemplos de Modelos Determinísticos la Ecuación del Balance Hidrológico, la Fórmula Racional y el Hidrograma Unitario. Un modelo de este tipo corresponde a un algoritmo de cálculo que da un resultado único.

En los Modelos Estocásticos el algoritmo de cálculo incluye una o varias componentes probabilísticas. Con los Modelos Estocásticos se generan series futuras de lluvias, de caudales, de niveles de embalses, o de eventos extremos.

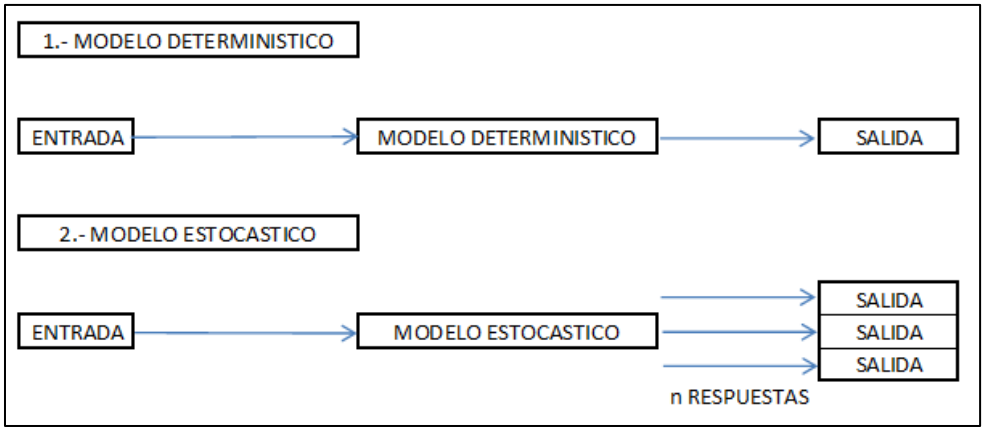


Figura 28. En el Modelo Determinístico dado un valor de entrada se obtiene un valor único de salida cada que se corre el modelo y en el Modelo Estocástico dado un valor de entrada se obtiene una respuesta diferente cada vez que se corre el modelo.

Los modelos de simulación permiten analizar diferentes situaciones para obtener un panorama amplio de posibles resultados de un problema. Aquí se incluyen los modelos de operación de embalses, de tránsito de crecientes y de avalanchas.

Por último los modelos de Optimización combinan la Simulación con los Costos y los Beneficios para determinar las soluciones más económicas.

4.2 Determinación de índice de uso de suelo

Con los resultados de los diferentes usos de suelo, se determinarán los diferentes índices de cambio de cada clasificación de la cuenca de estudio y por medio de ellos determinar la razón de cambio en los índices de utilización del territorio.

4.3 Razón de cambio en el proceso lluvia-escurrimiento

De acuerdo a los parámetros obtenidos, se llevará a cabo la captura de estos en el modelo de simulación hidrológico SHETRAN [5] que es un software de base física modelación hidrológica distribuida, por medio del cual se aplican las ecuaciones de *Saint Venant* para el tránsito de los escurrimientos acumulados en la cuenca del río Querétaro [6].

Las ecuaciones de *Saint Venant* que describen el flujo unidimensional de la onda larga y superficie libre en régimen no permeable son las siguientes:

- Ecuación de continuidad o de conservación de la masa de agua:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q \qquad (1)$$

- Ecuación de la conservación de la cantidad de movimiento:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial (\alpha \frac{Q^2}{A})}{\partial x} + gA\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gQ|Q|}{C^2AR} = 0 \qquad (2)$$

En donde:

t = Tiempo, s
x = Distancia medida a lo largo del eje del canal, m
Q = Caudal, m^3/s
A = Área hidráulica, m^2
q = Flujo lateral (descarga de tributarios y captaciones), m^3/s
h = Altura del nivel de agua con respecto al datum o nivel de referencia, m
C = Coeficiente de rugosidad de Chezy, $m^{1/2}/s$
R = Radio hidráulico, m
α = Factor de corrección debido a la distribución no uniforme de la velocidad en el término de advección o trasporte.

Por otra parte se determinará de manera potencial el cambio en los parámetros de Evapotranspiración potencial de acuerdo a los cambios de uso de suelo identificados, por medio de las ecuaciones de *Penman-Monteith*:

$$LE = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho C_p \frac{e_S - e}{r_h}}{\Delta + \gamma^*} \qquad (3)$$

Siendo

$$\gamma^* = \gamma\left(1 + \frac{r_c}{r_h}\right) \qquad (4)$$

Donde *LE*, es el flujo de calor latente (Wm^{-2}), R_n es la radiación neta (Wm^{-2}),*G* es el flujo de calor en el suelo (Wm^{-2}), ρ es la densidad del aire (kgm^{-3}), C_p es el calor especifico del aire $jkg^{-1}\ °C^{-1}$) a presión constante, $(e_s\text{-}e)$ es el déficit de presión de vapor en la atmosfera (kPa) y r_h es la resistencia aerodinámica al flujo de calor sensible (sm^{-1}). La resistencia de la cubierta vegetal, r_c, se puede estimar a partir de la resistencia estomática, r_s, y el índice de área foliar, L_t, según por la reacción propuesta por Allen y Col. (1989):

$$r_c = 2\frac{r_s}{L_t} \quad (4)$$

$$r_h = \frac{\ln\left(\frac{z-d}{z_M}\right)\ln\left(\frac{z-d}{z_h}\right)}{k^2 U_z} \quad (5)$$

Donde *z* es la altura a la que se mide la velocidad del viento (m), d es la altura del desplazamiento del plano cero (m), z_M es el coeficiente de rugosidad para la transferencia del momento (m), z_h es el coeficiente de rugosidad para el vapor y se estima en $0.2z_M$, k es la constante de von Karman para la difusión turbulenta y U_z es la velocidad del viento a la altura *z* en ms^{-1}[7].

4.4 SHETRAN

Los modelos matemáticos están cobrando relevancia en estos procesos, especialmente para representar los impactos físicos de cambios en el uso de suelo. El SHETRAN un modelo de base física espacialmente distribuido, que tiene como objetivo el proceso de medición, ya que utiliza leyes físicas universales.

Es un sistema de modelación integrado superficial y sub-superficial, que incorpora los procesos hidrológicos del movimiento del agua (intercepción, evapotranspiración, derretimiento de nieve, escurrimiento en canales, superficial y sub-superficial del agua) y transporte de sedimentos; modelando la erosión del suelo por impacto de la gota de lluvia y arrastre laminar, además de los flujos superficiales, y el transporte de sedimentos.

Cada proceso es modelado por leyes físicas: La distribución espacial de las propiedades de la cuenca, la entrada de datos y la respuesta, se representa en una grilla de diferencias finitas. Los datos requeridos por SHETRAN, comprenden:

1) Entrada de datos meteorológicos necesarios para manejar la simulación

2) Datos de salida de variables (por ejemplo caudales de ríos y registro de producción de sedimentos) para validar el modelo.

3) Datos de las propiedades que caracterizan una cuenca en particular (suelos, vegetación, topografía y características de los sedimentos).

Estos datos pueden estar basados en medidas directas o ser estimados a partir de bibliografía; se pueden referir a condiciones actuales de las cuencas hidrográficas o a distintos escenarios (por ejemplo futuras alteraciones climáticas y en cubiertas vegetales).

Simular los impactos ambientales como eventos de inundación, producto de cambios en el uso de suelo, son evaluados en forma adecuada a través de la tendencia de la curva de descarga; en éste sentido los eventos de crecida, se simulan en cuanto a su ocurrencia en el tiempo en concordancia con eventos reales y calibrados en las cuencas hidrográficas. SHETRAN, proporciona una descripción detallada en el tiempo y en el espacio de flujos y transportes en la cuenca. Sirve como herramienta para investigar impactos hidrológicos y de sedimento.

El modelo SHETRAN permite evaluar el efecto de la utilización de diferentes estrategias forestales y/o manejo de cuencas, de tal forma de simular las consecuencias antes de su implementación en terreno. Permite también la predicción de impactos antes las potenciales inversiones de protección ambiental.

Los Componentes del modelo SHETRAN o input requeridos son:

A.- Componentes Base de la Cuenca (FRD)

Se incorpora todos los parámetros de caracterización base de la cuenca hidrográfica (por ejemplo altitud, vegetación y suelos)

B.- Componentes de intercepción y evapotranspiración (ETD)

Usa la información meteorológica para simular la evapotranspiración total y la lluvia neta resultante de éste proceso.

Para el cálculo de la intercepción, se utiliza el modelo modificado de *Rutter*. Mientras, para la evapotranspiración se utiliza la ecuación de *Penman- Monteith*. Este módulo calcula:

- La Evapotranspiración a partir de la vegetación, el suelo y las superficies de agua libre.
- Evaporación desde el dosel húmedo
- Evaporación desde superficies de agua libre.
- Transpiración desde las plantas.
- Captación de las plantas desde el suelo en la zona radicular.
- Almacenamiento del dosel.
- Drenaje desde el dosel.
- Precipitación neta debajo del dosel

El cálculo de la Evapotranspiración actual y potencial. Se obtiene a partir de las condiciones meteorológicas, las propiedades del suelo y la cobertura vegetal, y es independiente de las condiciones de flujo en el suelo y de las restricciones fisiológicas en la Evapotranspiración del sistema planta–raíz.

C.- Escurrimiento superficial (ES) y Escurrimiento en canales (OCD)

La profundidad de la columna de agua es igual a la caída pluviométrica menos la evapotranspiración y la infiltración. Se utiliza las ecuaciones de *Saint- Venant*. En donde,

ES total =ESd + flujo sub-superficial

Este módulo Calcula:

- La profundidad de superficie del agua en la superficie de suelo y en las redes de canales.

- El flujo de superficie de agua que cruza la superficie de suelo, a lo largo de las redes de canales, y adentro o afuera de los canales.

Factores que influyen en la Escorrentía

Superficial (ES)

I. Climáticos

- Intensidad de precipitación

- Duración de la precipitación, que es directamente proporcional a ES.

- Precipitación antecedente, precipitación cuando el suelo ya está húmedo por una lluvia anterior.

II. Fisiográficos

- Área de la hoya, directamente relacionada con la mayor o menor cantidad de agua de ES que la hoya puede generar.

- Permeabilidad, que influya en la capacidad de infiltración. Más permeable el suelo, mayor es la cantidad de agua que puede absorber.

III. Humanos

- Obras hidráulicas construidas en la hoya (ej: presa)

- Rectificación de ríos (aumento de la velocidad de ES)

Variables que caracterizan la Escorrentía

Superficial

1. Caudal, Q (m^3/s, l/s)

$$Q = v/t$$

* Caudal específico, q. ($m^3/s/km^2$, l/s/ km^2)

$$q = Q/A$$

2. Coeficiente de ES, C

$$C = (\text{Volumen ES total})$$

(Volumen precipitación total) tiempo Se puede definir en función a una lluvia aislada o a un intervalo de tiempo con varias lluvias.

Conociendo C para una determinada lluvia con cierta intensidad y duración en un área dada, se puede determinar Escorrentía Superficial de otras precipitaciones de diferentes intensidades.

3. Tiempo de concentración, Tc (minutos, horas).

Es el tiempo en el cual la lluvia que cae en el punto más distante de la corriente de agua de una cuenca, tarda en llegar a una sección determinada de dicha corriente. Mide el tiempo que se necesita para que toda la hoya contribuya con escorrentía superficial en una sección dada.

4. Período de retorno, T.

Es el período promedio en años, en que un evento (caudal) es igualado o superado por lo menos una vez.

5. Nivel de agua, h.

La altura alcanzada por el nivel de agua en relación con un nivel de referencia.

D.- Componentes de la zona saturada (SDZ)

El nivel de la superficie freática y su flujo, además de su variación espacial en relación con la caída pluviométrica. Para la determinación del volumen de agua se utiliza la ecuación de *Boussinesq*, que combina la Ley de Darcy y la ecuación de conservación de masas.

Este módulo, calcula:

- Niveles de superficie freática para un acuífero singular no confinado.

-Volumen de flujo lateral en la zona saturada. Flujo en suelos saturado Bajo ciertas condiciones, una mínima parte de un perfil de suelo podría estar completamente saturado, es decir todos los poros se encuentran llenos de agua.

Los suelos pobremente drenados se encuentran saturados

El flujo de agua bajo condiciones de saturación está determinado por dos factores:

- Fuerza hidráulica (f), que maneja el agua a través del suelo (comúnmente gravedad).

- Conductividad hidráulica (K), o la facilidad con el cual los poros del suelo permiten el movimiento del agua.

De acuerdo a la relación de éstas variables, se obtiene que el volumen de agua movida por unidad de tiempo, corresponde a $V = Kf$

La Conductividad Hidráulica (K), de un suelo uniforme saturado es esencialmente constante y es dependiente del tamaño y configuración de los poros del suelo. La fuerza conductora (gradiente hidráulico), es la diferencia entre la altura del agua por encima y debajo de la columna de suelo. La fuerza hidráulica, además causará flujo horizontal y ascendente

Factores que influyen en la Conductividad Hidráulica (K)

- Tamaño y configuración de los poros del suelo.

- La textura y la estructura del suelo, son las propiedades por las cuales K está más directamente relacionada. Ej: suelos acuosos tienen más alta conductividad saturada, que suelos de textura más fina.

Los suelos con estructura granular estable, conducen el agua más rápidamente que aquellos con unidades estructurales más inestables.

E.- Componentes de la zona no saturada (UZD)

Determina la humedad del suelo y precisión, además la distribución de la zona no saturada.

Utiliza la ecuación de Richards, 1931.

Incluye el cálculo de:

- Potencial de presión en la zona no saturada
- Contenido de humedad del suelo en la zona no saturada
- Flujo vertical en la zona no saturada
- Infiltración en la superficie del suelo y para canales secos
- Recarga a la zona saturada

Flujo en suelos no saturado

Los macro poros están llenos de aire, quedando sólo los poros finos para acomodar el movimiento del agua, que es lento. Existe una relación entre potencial mátrico (Ψm) y K. La región cerca del potencial 0, muestra flujo saturado, con una K miles de veces más grande que los potenciales que caracterizan flujo no saturado (- 0.1 bar y por debajo).

A mayor potencial mátrico, mayor contenido de humedad. En éste caso la fuerza que mueve el agua es el gradiente potencial mátrico. El movimiento será desde una zona con capas espesas húmedas (mayor Ψm) a uno con capas delgadas (menor Ψm).

Flujo sub-superficial

Es parte del agua gravitacional que no alcanza a llegar hasta el nivel freático porque toma una dirección paralela a la de la superficie del suelo, para salir nuevamente al aire libre y convertirse en escorrentía superficial.

Resultados de SHETRAN

Sobre la base de los input requeridos por el modelo SHETRAN, entrega alrededor de 40 variables de salida (output), las cuales se concentran en tres módulos:

1.- Flujo de Escorrentía:

- Caída pluviométrica neta (mm/hr)

- Evaporación potencial (mm/hr)
- Evaporación actual (mm/hr)
- Evaporación desde la superficie del suelo (mm/hr)
- Evaporación desde la intercepción almacenada (mm/hr)
- Drenaje desde la intercepción almacenada (mm/hr)
- Almacenamiento en la copa (mm/ hora)
- Infiltración (mm/hora)
- Tasa de intercambio de almacenamiento de la zona no saturada (mm/ hora)
- Profundidad del nivel freático bajo la superficie (m)
- Flujo de la zona saturada (m3/s)
- Escurrimiento superficial (m3/s)
- Profundidad del agua superficial (m)
- Intercambio de flujo entre el canal y acuífero (m3/s)
- Cara de Intercambio de flujo entre el canal y acuífero (m3/s)
- Intercambio de flujo entre la zona la zona no saturada y el canal (m3/s)
- Presión de la cabecera de la zona no saturada (m)
- Contenido de agua de la zona no saturada (m3)

2.- De Transporte de Sedimentos.

3.- Migración de contaminantes

De acuerdo a los parámetros de cuenca realizados en trabajos de investigación del Centro de Investigaciones del Agua, se lleva a cabo la captura de los parámetros de la cuenca del río Querétaro, con las siguientes pantallas de captura para el modelo numérico en el cual de

manera general se lleva a cabo la comparación de los resultados obtenidos de manera de poder llevar a cabo una comparación cuantitativa de los resultados de los escenarios mostrados en las diferentes imágenes de satélite, considerando los parámetros siguientes:

4.4.1 Uso de suelo:

De acuerdo a la clasificación de uso de suelo, se lleva a cabo la agregación del modelo clasificado de satélite, con la figura muestra siguiente:

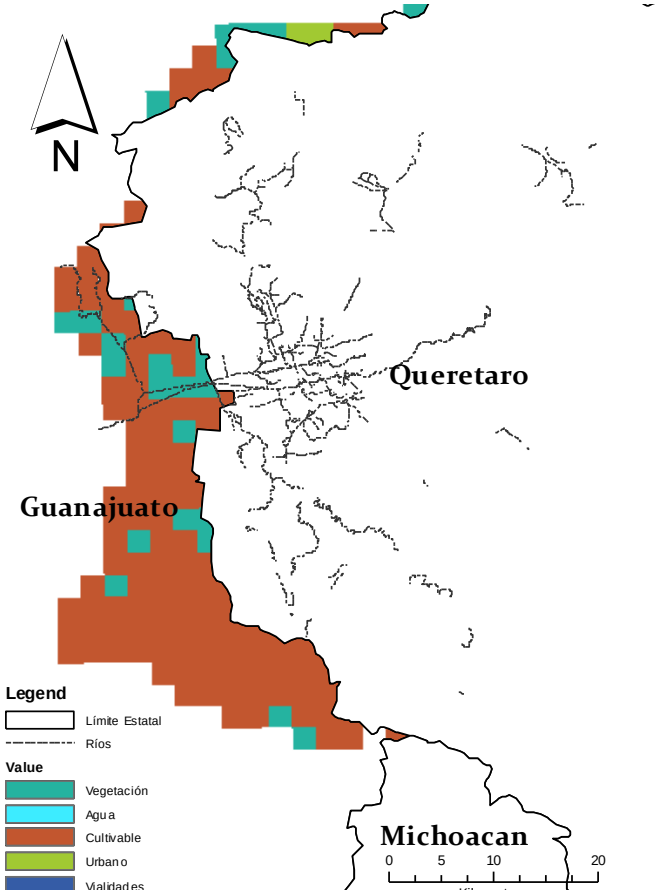


Figura 29. Vista de la imagen clasificada para aplicarse en el programa SHETRAN.

Tabla 7. Muestra de los parámetros de uso de suelo utilizados de acuerdo a los diferentes usos de suelo de la cuenca del Río Querétaro.

Tipo/ clase	**Tipo de vegetación**	**Capacidad de almacenamiento de la vegetación (mm)**	**Índice de área foliar**	**Profundidad máxima zona radical (m)**	**AE/PE** Evap. Actual/Evap. Potencial
1	Forestal	5	6	1.5	.4
2	Pastizal	1.5	6	1	.5
3	Suelo cultivable	1.5	4	0.8	.7
4	Uso urbano	0	0.3	0.5	.3
5	Vialidades/superficie impermeable	0	0.1	0.0	1

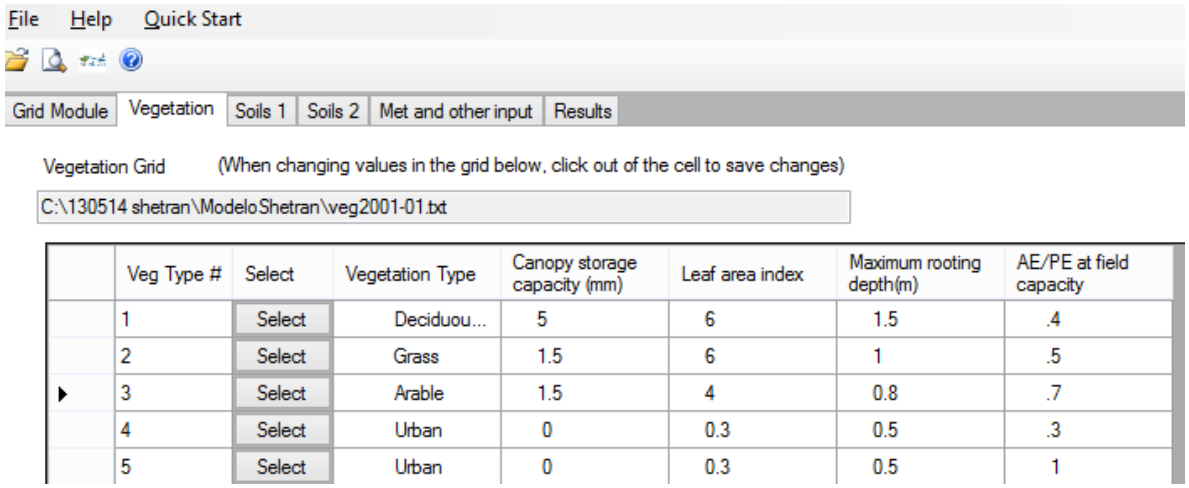


Figura 30. Vista de la captura de los parámetros de uso de suelo en el programa SHETRAN.

4.4.2 Edafología

De la misma manera la información existente de edafología de la cuenca y preparada para SHETRAN, se muestra a continuación:

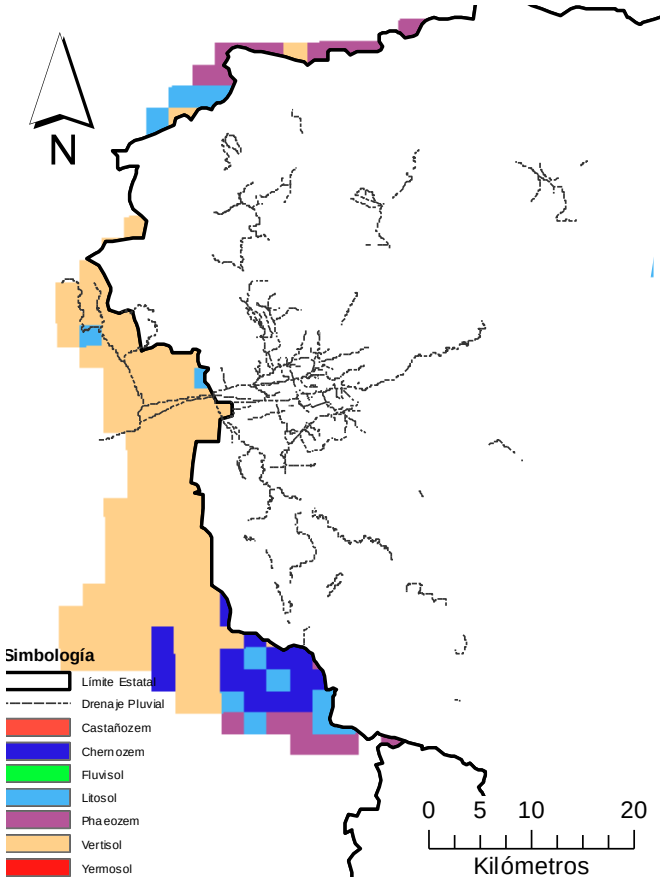


Figura 31. Edafología de la cuenca de aportación preparada para su uso en SHETRAN.

Grid Module | Vegetation | Soils 1 | Soils 2 | Met and other input | Results

Define soil parameters for each soil category and layer

C:\130514 shetran\ModeloShetran\clpsuelorstr3.txt

(When changing values in the grid below, click out of the cell to save changes)

Soil Category	Soil Layer	Select	Soil Type	Depth at base of layer (m)	Saturated Water Content	Residual Water Content	Saturated Conductivity (m/day)	vanGenuchten-alpha (cm-1)	vanGenuchten-n
1	1	Select	SiltLoam(1...	1	.452	0.093	0.163	5.15E-03	1.681
2	1	Select	LoamySan...	1	0.37	0.075	0.467	1.99E-02	1.793
3	1	Select	SandySiltL...	1	0.434	0.086	0.317	8.38E-03	1.587
3	2	Select	SiltyClayL...	2	0.507	0.144	0.036	7.24E-03	1.608
3	3	Select	Bedrock	5	0.2	0.03	0.1	3.0e-02	1.90
4	1	Select	ClayLoam(...	1	0.489	0.153	0.055	9.23E-03	1.657
6	1	Select	SandyClay...	1	0.499	0.233	0.029	1.07E-02	1.879
7	1	Select	SiltyClay(1...	1	0.529	0.212	0.019	6.54E-03	1.531
8	1	Select	SandyLoa...	1	0.412	0.098	0.622	1.44E-02	1.736

Figura 32. Datos de la pantalla de captura preparados dentro del modelo a utilizar

Climatología

Para el caso de la climatología, se pueden emplear los datos de precipitación empleados para las diferentes estaciones climatológicas de la cuenca de aportación, para el caso de comparativa de los volúmenes potenciales que pueden escurrir de la cuenca de aportación, se han aplicado los datos de los registros climatológicos para el año 2003 con los registros que se muestran en la Tabla siguiente.

Nombre	Altitud msnm	Total 2003 (mm)
El Batan (22004)	1881	1,119.50
El Pueblito (22006)	1826	1,079.00
Carrillo (22027)	1800	994.80
Juriquilla (22045)	1885	904.20
Queretaro (22063)	1813	934.20
	Media:	1,006.34

5 RESULTADOS

5.1 Cambios de uso de suelo

Considerando los datos calculados para los cambios de uso de suelo en la cuenca de aportación para los diferentes periodos analizados, se obtuvieron los valores que se muestran en las tablas siguientes, en donde se puede apreciar que los cambios significativos en cambios de uso de suelo urbano, se acentúan a partir del año 2005 y que para el año 2011, se presentan variaciones con crecimientos exponenciales desde el año 2009.

Tabla 8. Variación de las áreas a través de los diferentes años dentro de la cuenca de Querétaro.

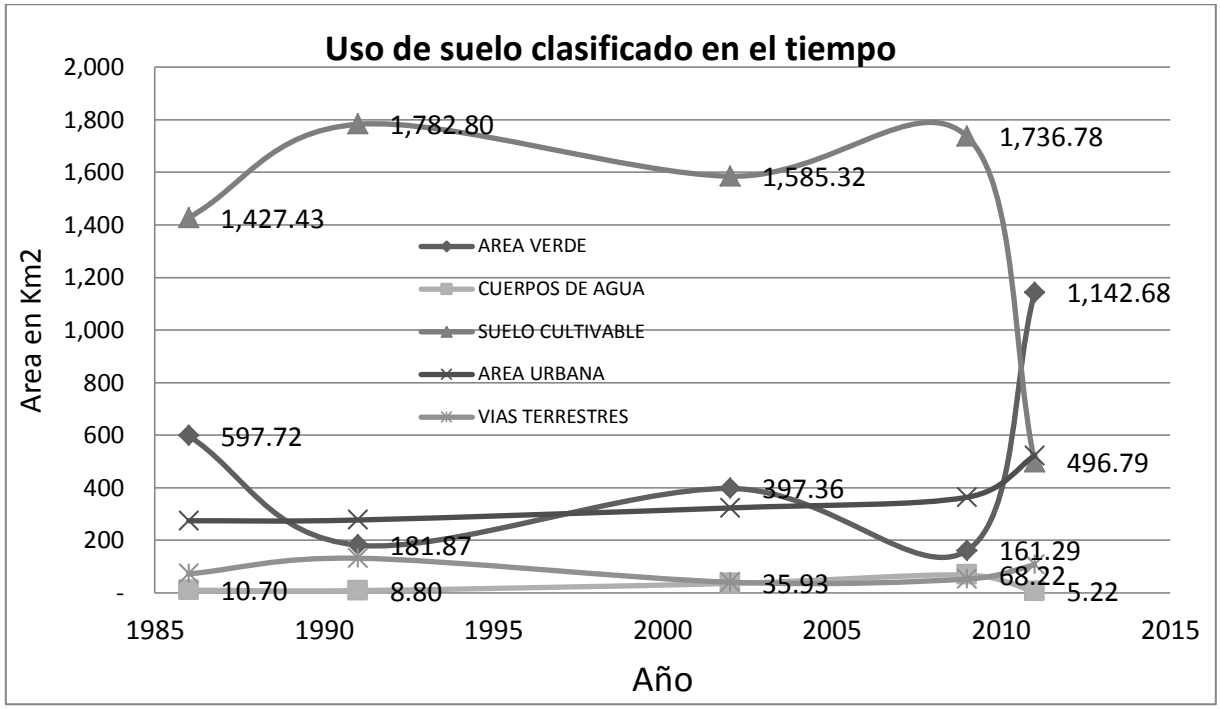
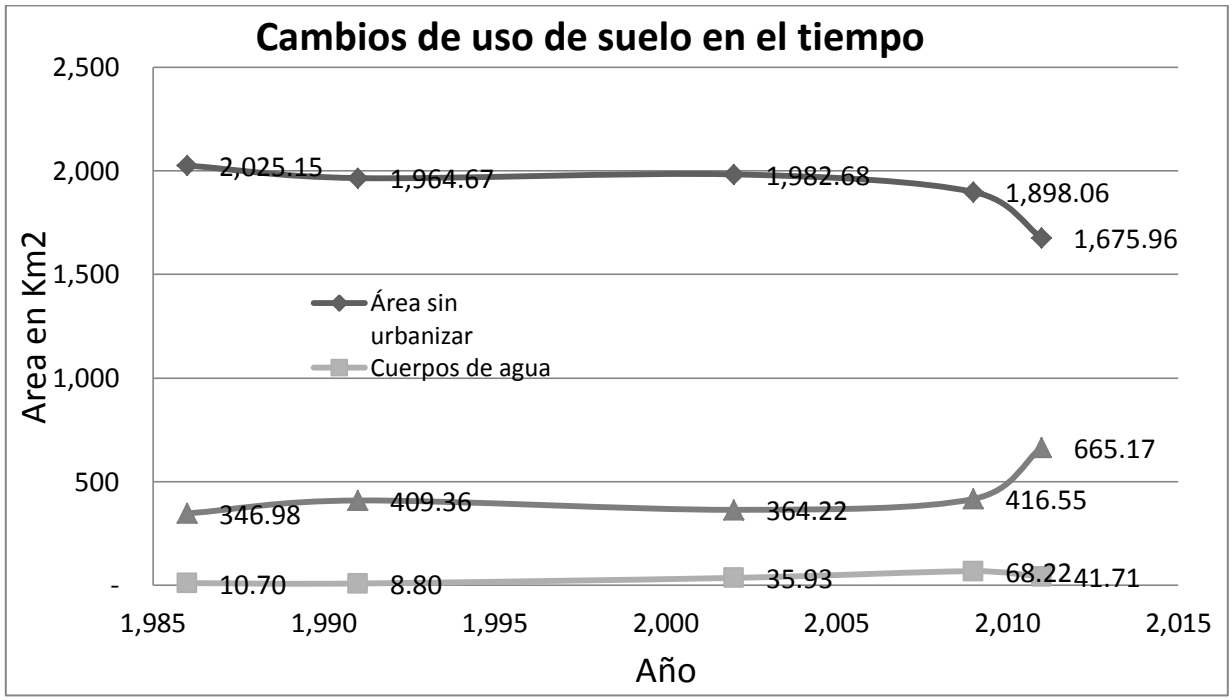


Tabla 9. Variación de las áreas englobando áreas verdes y suelo cultivable, zona urbana y vías terrestres.



Cambios en los caudales que se presentan en la cuenca, con una misma cantidad de precipitación acumulada en 24 horas.

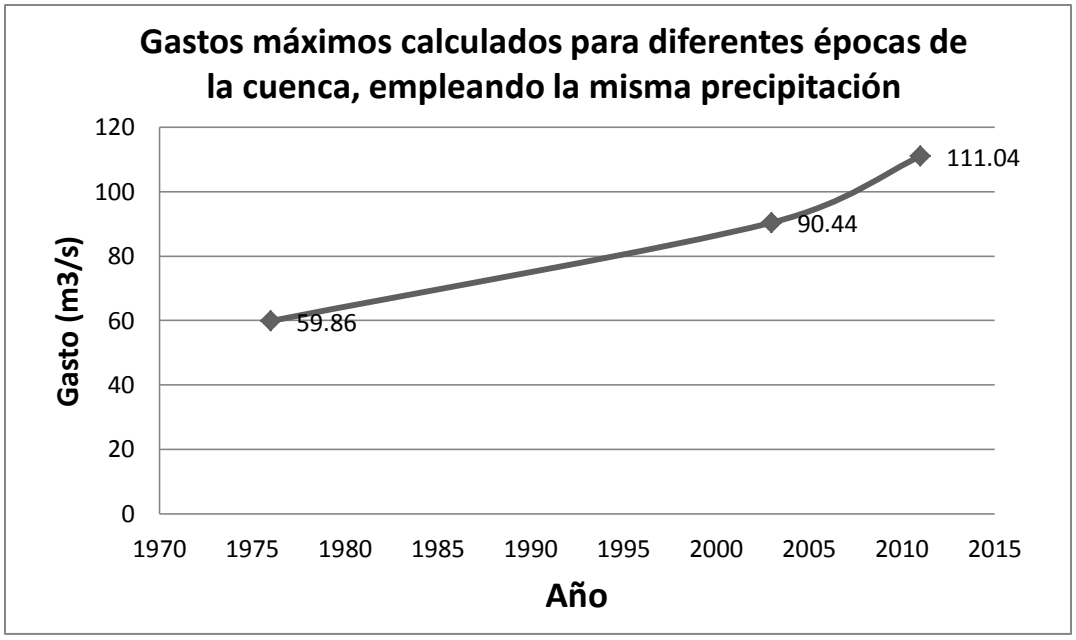


Figura 33. Gastos máximos calculados para diferentes años de uso de suelo en la cuenca, para una misma precipitación acumulada en 24 horas.

6 CONCLUSIONES

Para la realización de este trabajo fue importante la fecha de la toma de la imagen ya que como sabemos las estaciones del año hacen que cambien las condiciones del entorno y de esta manera cambian las tonalidades en la imagen de satélite, por esto se requiere tener un amplio conocimiento de la zona de estudio para así poder tener resultados consistentes.

Al final en la gráfica de las diferentes áreas clasificadas se puede notar como varían estas áreas en el transcurso de los años.

Por este motivo se realizó la clasificación supervisada para poder asignar puntos de clasificación a lugares conocidos y de esta manera ser más exactos en la clasificación de la cuenca, ya que los puntos más relevantes y en constante cambio son las áreas verdes, el suelo cultivable, los cuerpos de agua y por su puesto la mancha urbana que es la que va modificando poco a poco las anteriores mencionadas.

Algunas de las imágenes disponibles presentaron defectos tales como nubes sobre la cuenca o mala calidad en la imagen, estas imágenes se trataron de remplazar por algún año siguiente en el caso de que la imagen estuviera disponible.

Los resultados de la comparativa de los caudales observados para diferentes épocas de la cuenca de aportación, en la cual cambia el uso de suelo, indican que los gastos máximos que se observan dado el incremento de la mancha urbana, se incrementan de manera más acentuada, a partir del año 2003, lo que representa un efecto en la cuenca de aportación, del cual se deben evaluar los efectos ocasionados y la manera de que estos no afecten al medio natural o la calidad de los recursos existentes en la cuenca.

7 REFERENCIAS

[2] semarnat.gob.mx (INEGI. Carta de uso actual de suelo y vegetación serie I, II y III)

[3] INEGI. Censo de Población y Vivienda 2010. INEGI. Querétaro. Perfil Sociodemográfico, XII Censo de Población y Vivienda 2000.

[4] Apuntes de Hidrología, 2012-1.

[5] desarrollado por la Escuela de Ingeniería Civil y Geo ciencias de la Universidad de Newcastle.

[6] Juan P. Martin Vide, Ingeniería de ríos, 2002, ediciones UPC, pág. 77-79.

[7] Francisco Elías Castillo, Francesc Castellví Sentis, Agrometeorología, grupo Mundi-Prensa, 2° edición, pág. 274.

[8] Carlos Jaime Prieto Bolivar, El Agua, Sus formas, Efectos, Abastecimientos, Usos, Daños, Control y Conservación, ECODE Ediciones pág. 30.

[9] Laura, Elena Madescon, Principios de Hidrogeografia Estudio del ciclo Hidrológico, UNAM GEOGRAFIA, serie Textos universitarios pag 12

Fundamentos de hidrología de superficie; Francisco J.Aparicio Mijares; Ed. Limusa.
Procesos del Ciclo Hidrológico; D. F. Campos Aranda; Universidad Autónoma de San Luís Potosí.
Hidrología en la Ingeniería; Germán Monsalve Sáenz; Ed. Alfaomega.
Escurrimiento en cuencas grandes; Facultad de Ingeniería UNAM.
Hidrología; Rolando Springall G.; Facultad de Ingeniería de la UNAM.
Hidrología para Ingenieros; Lisnley-Kholer-Paulus;
Hidrología; Rolando Springall G.; Facultad de Ingeniería UNAM.
Ingeniería de los Recursos Hidráulicos; Linsley y Franzini.
Análisis estadístico y probabilística de datos hidrológicos; Rolando Springall;

Facultad de Ingeniería de la UNAM.

Probabilidad y estadística en Ingeniería Civil; Jack R. Benjamín; Mc Graw Hill.

George E. Russell, Hidráulica, editorial Continental.

Gilberto Sotelo Ávila, Hidráulica General, editorial Limusa.

Juan H. Cadavid R. Hidráulica de canales Fundamentos, Fondo Editorial Universidad EAFIT.

Ven Te Chow, Hidráulica de canales abiertos, editorial Mc Graw Hill.

Haan, Ch. STATISTICAL METHODS IN HYDROLOGY. Iowa State University Press. 1977.

[1] http://cuentame.inegi.org.mx/poblacion/densidad.aspx?tema=P

[4] http://definicion.de/cartografia/

[10].-http://www.teledet.com.uy/tutorial-imagenes-satelitales/imagenes-satelitales-tutorial.htm

[11]. http://glovis.usgs.gov/

http://www.geocities.com/gsilvam/estocastica.htm

http://world.bymap.org/Population.html

http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_04/02_vegetacion/cap2_3.html

http://www.miliarium.com/Proyectos/SuelosContaminados/Manuales/Problemasusosuelo.asp

http://www.revistaciencia.amc.edu.mx/index.php/ediciones-anteriores/135.html?task=view.

http://www.ingenieroambiental.com/4025/tesis%20medio%20ambiente%283%29.pdf

http://research.ncl.ac.uk/shetran/Introduction.htm

Anexo A.

Imágenes satelitales en color verdadero

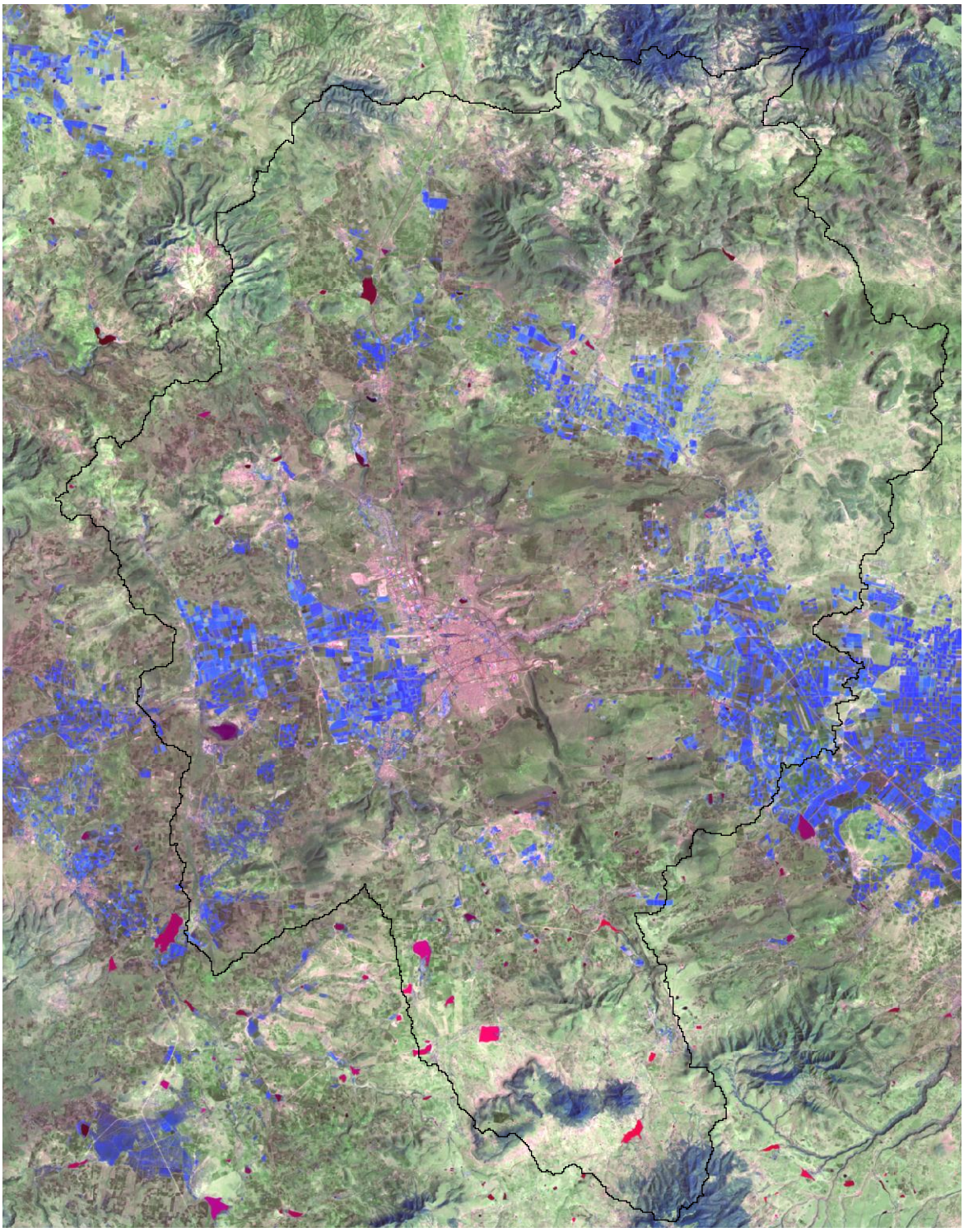


Imagen en color verdadero de la cuenca de Querétaro, 3 de Junio de 1986

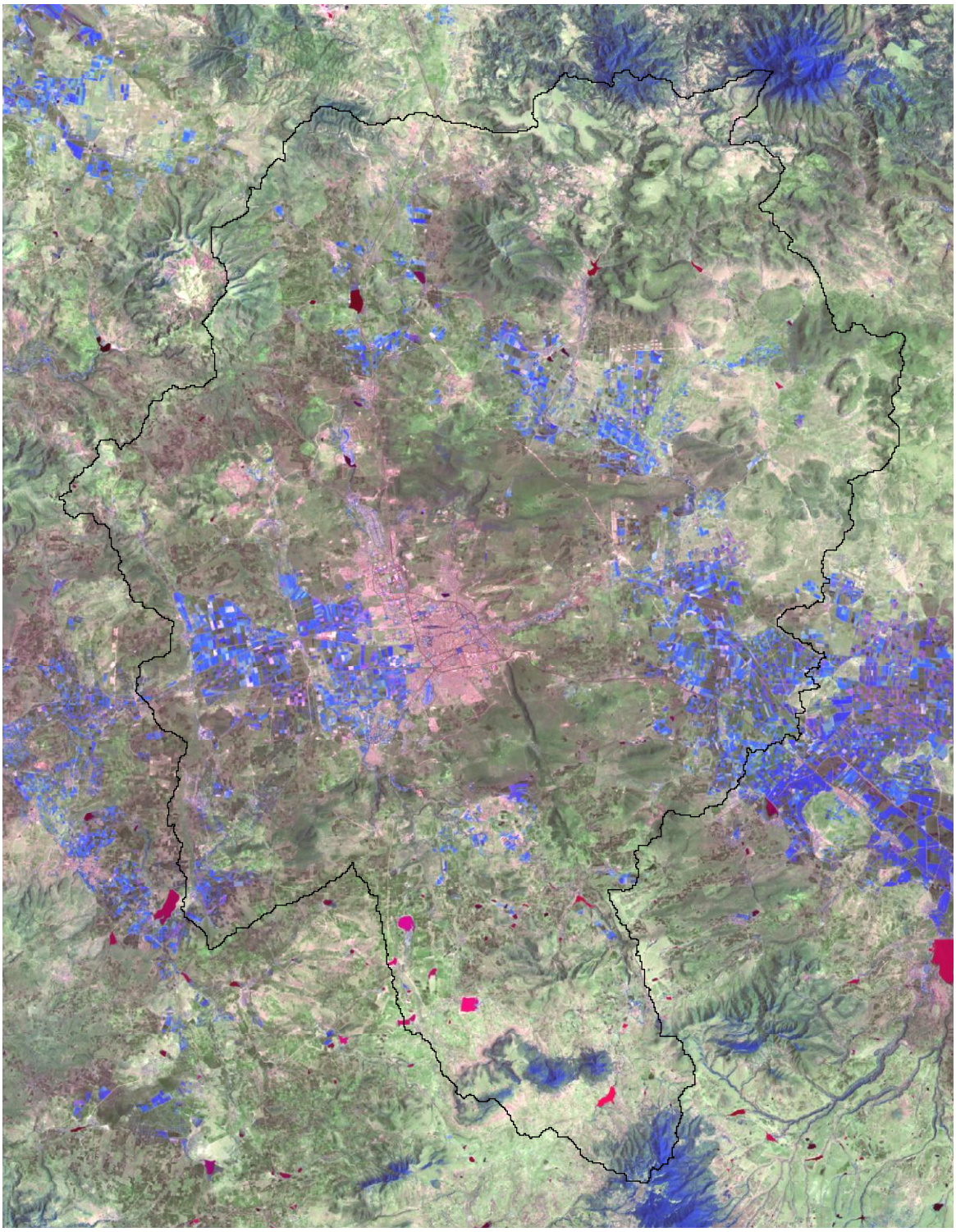


Imagen en color verdadero de la cuenca de Querétaro,3 de Noviembre de 1991

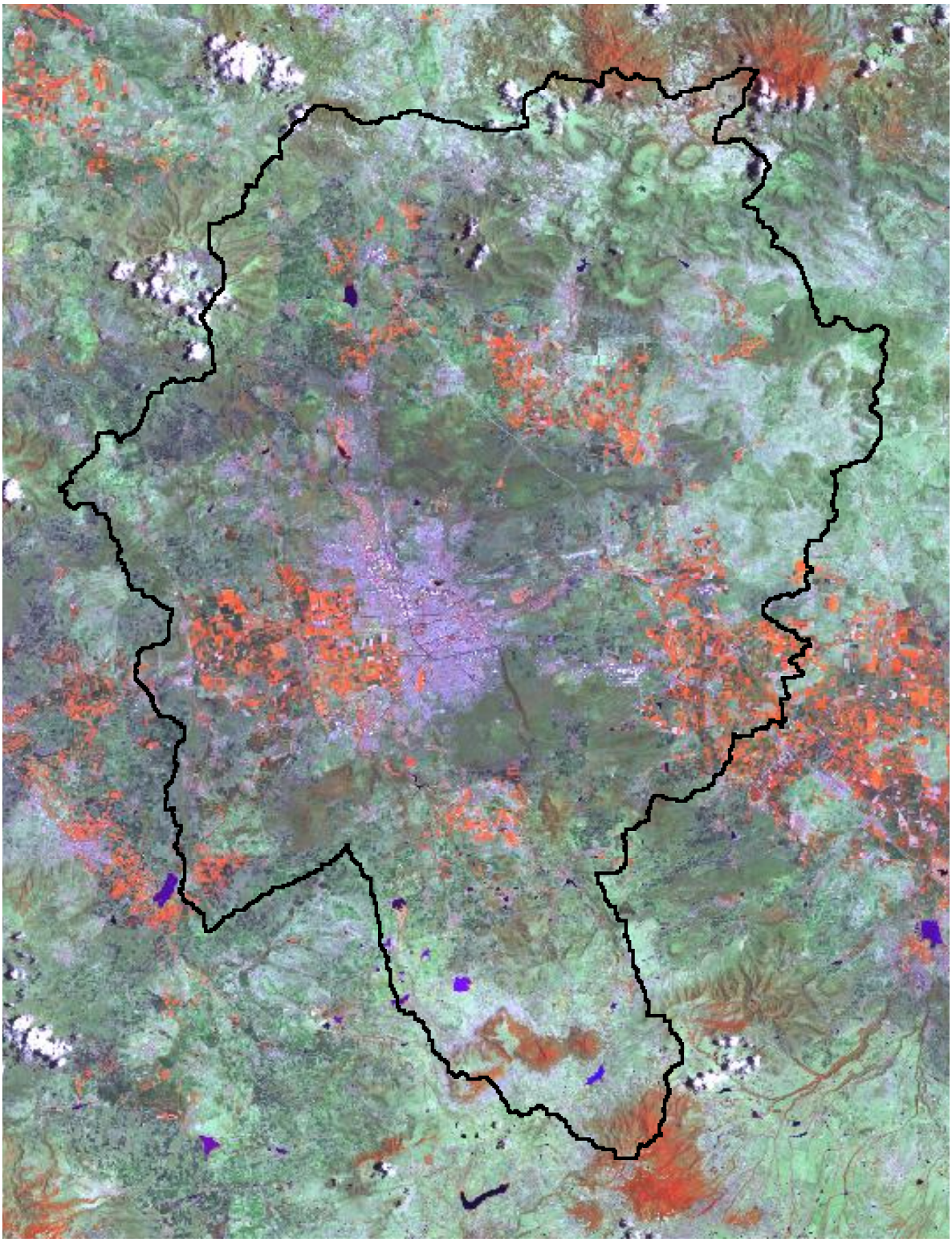


Imagen en color verdadero de la cuenca de Querétaro, 21 de Mayo de 2002

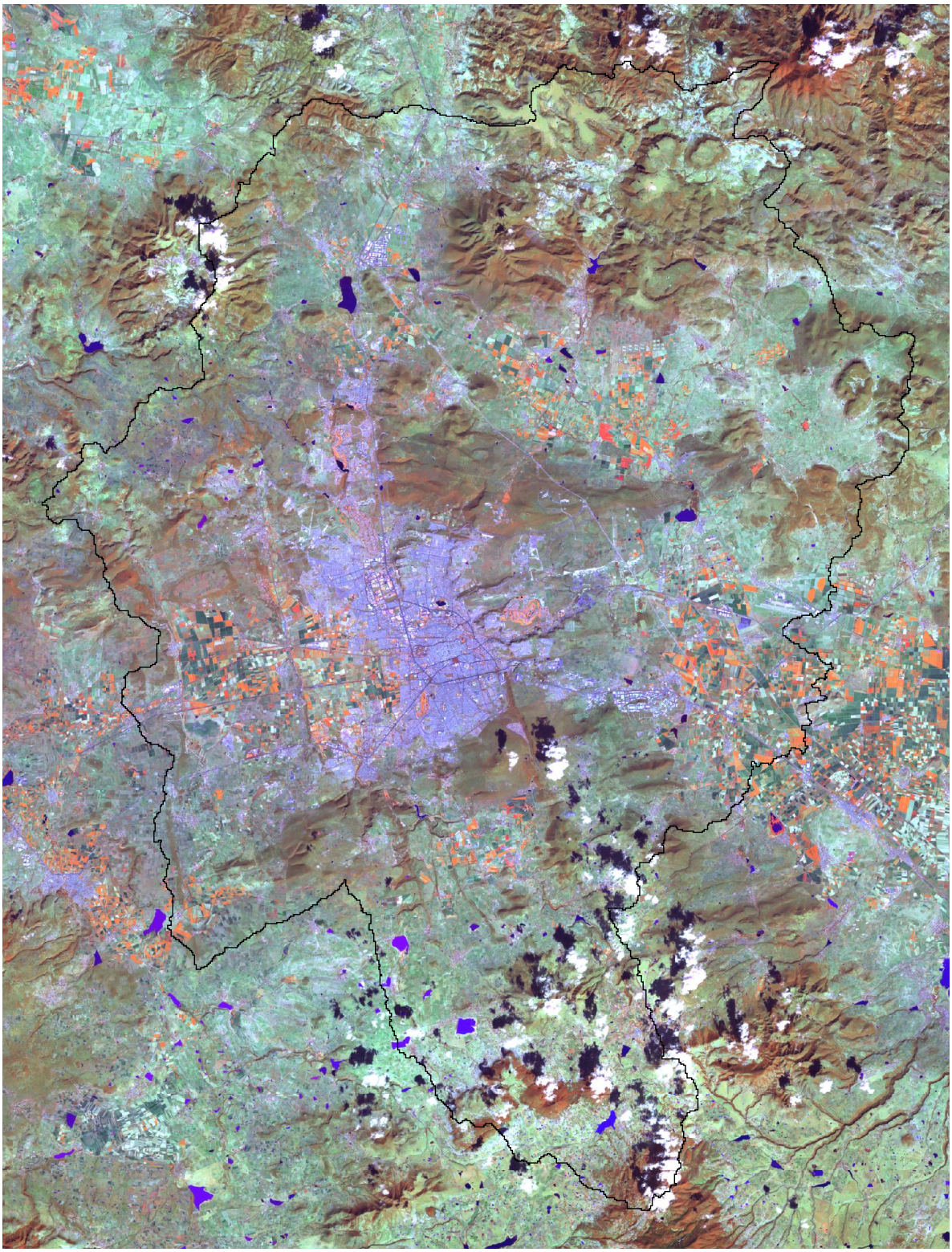


Imagen en color verdadero de la cuenca de Querétaro, 3 de Marzo 2009

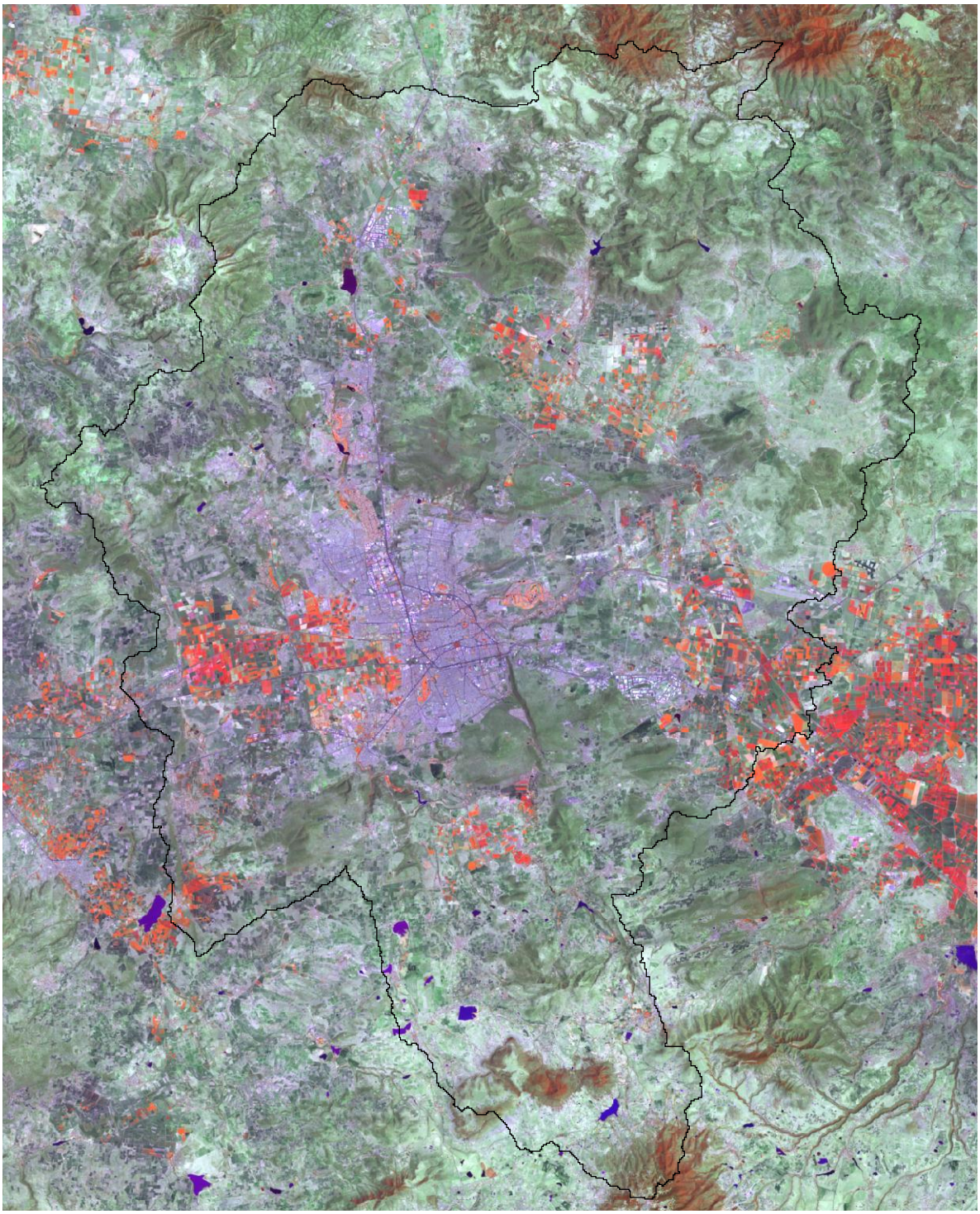


Imagen en color verdadero de la cuenca de Querétaro, 4 de Septiembre 2011.

Anexo B.

Clasificación no supervisada de imágenes de satélite

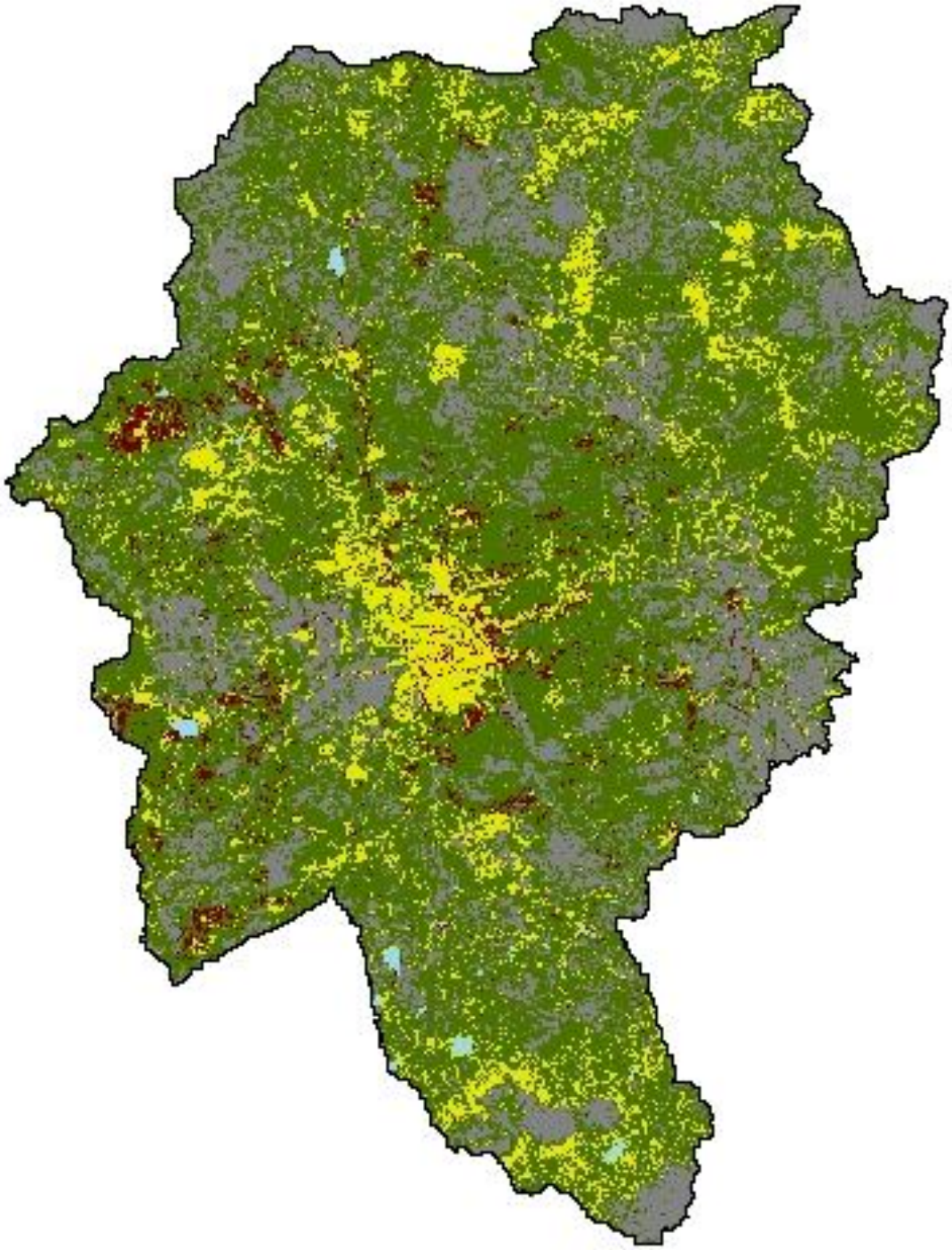


Imagen clasificada de la cuenca de Querétaro, 3 de Junio 1986

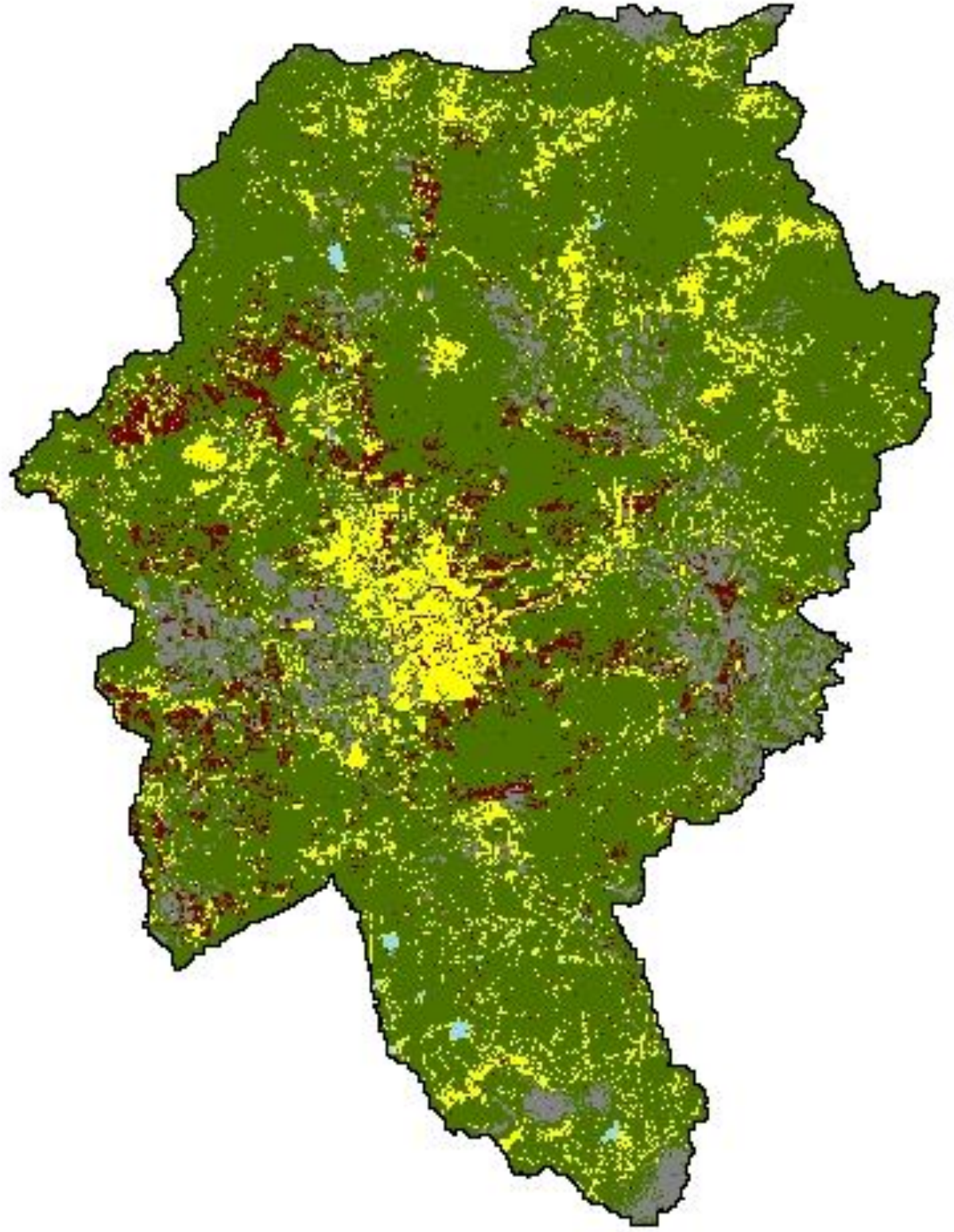


Imagen clasificada de la cuenca de Querétaro, 3 de Noviembre 1991

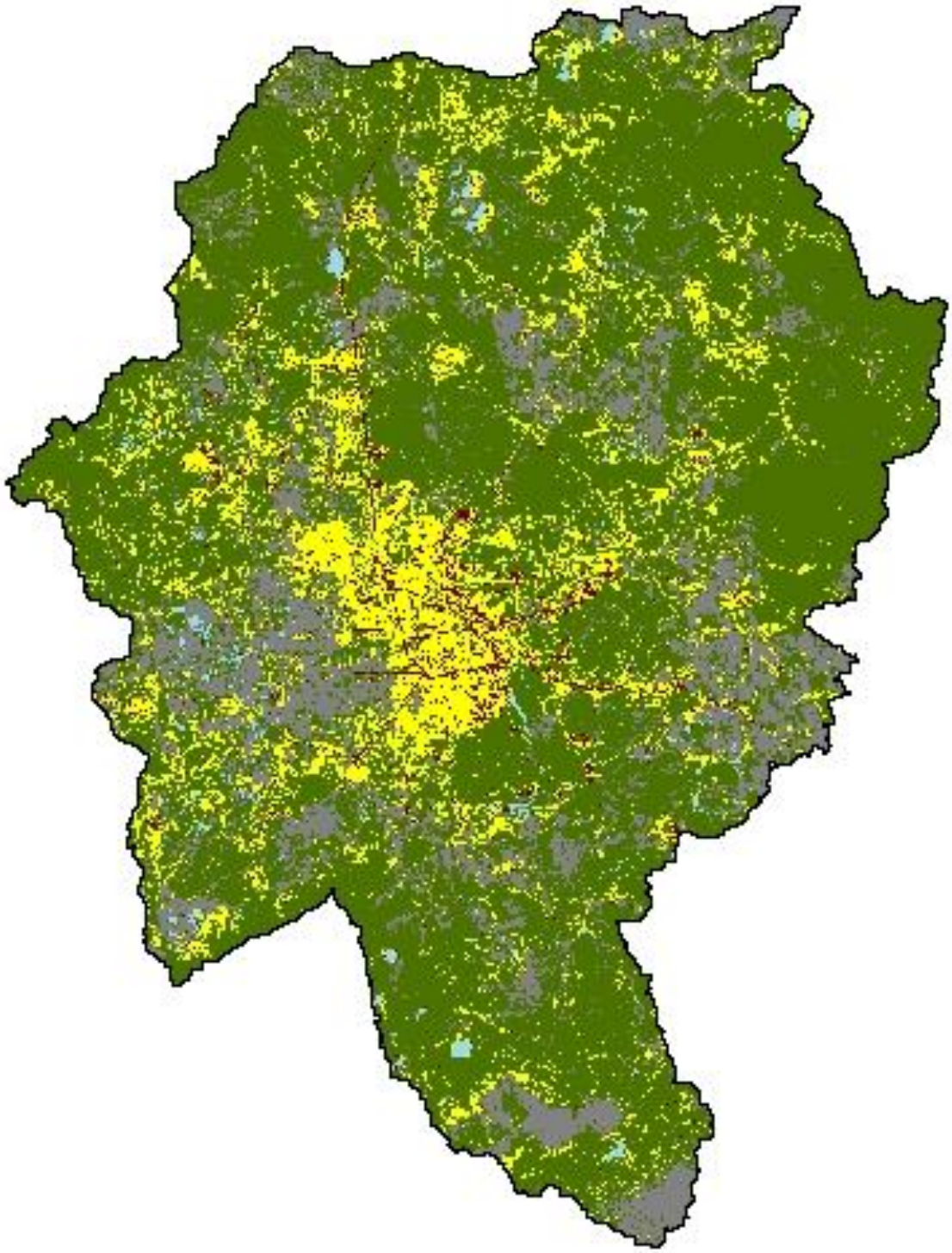


Imagen clasificada de la cuenca de Querétaro, 21 de Mayo 2002

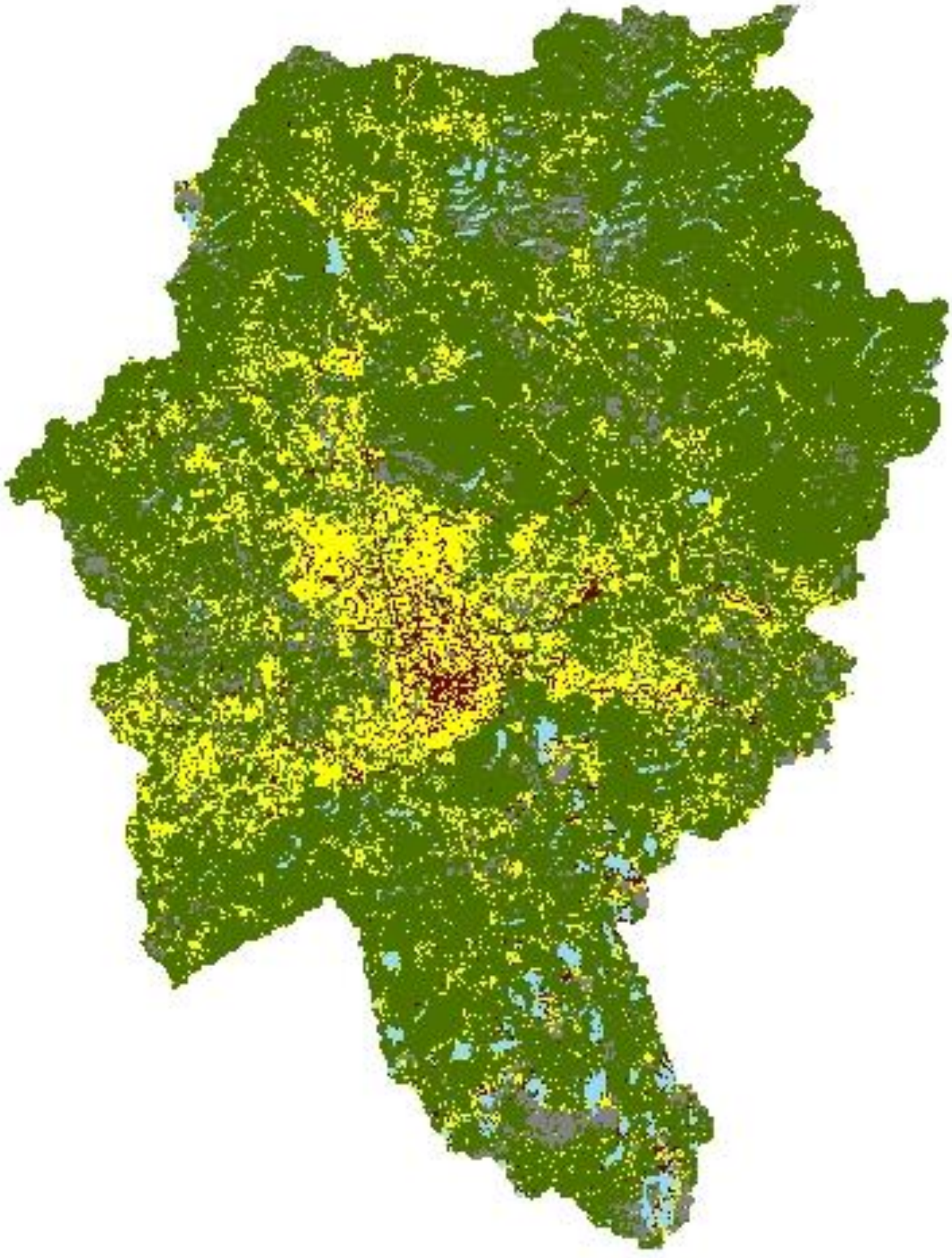


Imagen clasificada de la cuenca de Querétaro, 3 de Marzo 2009

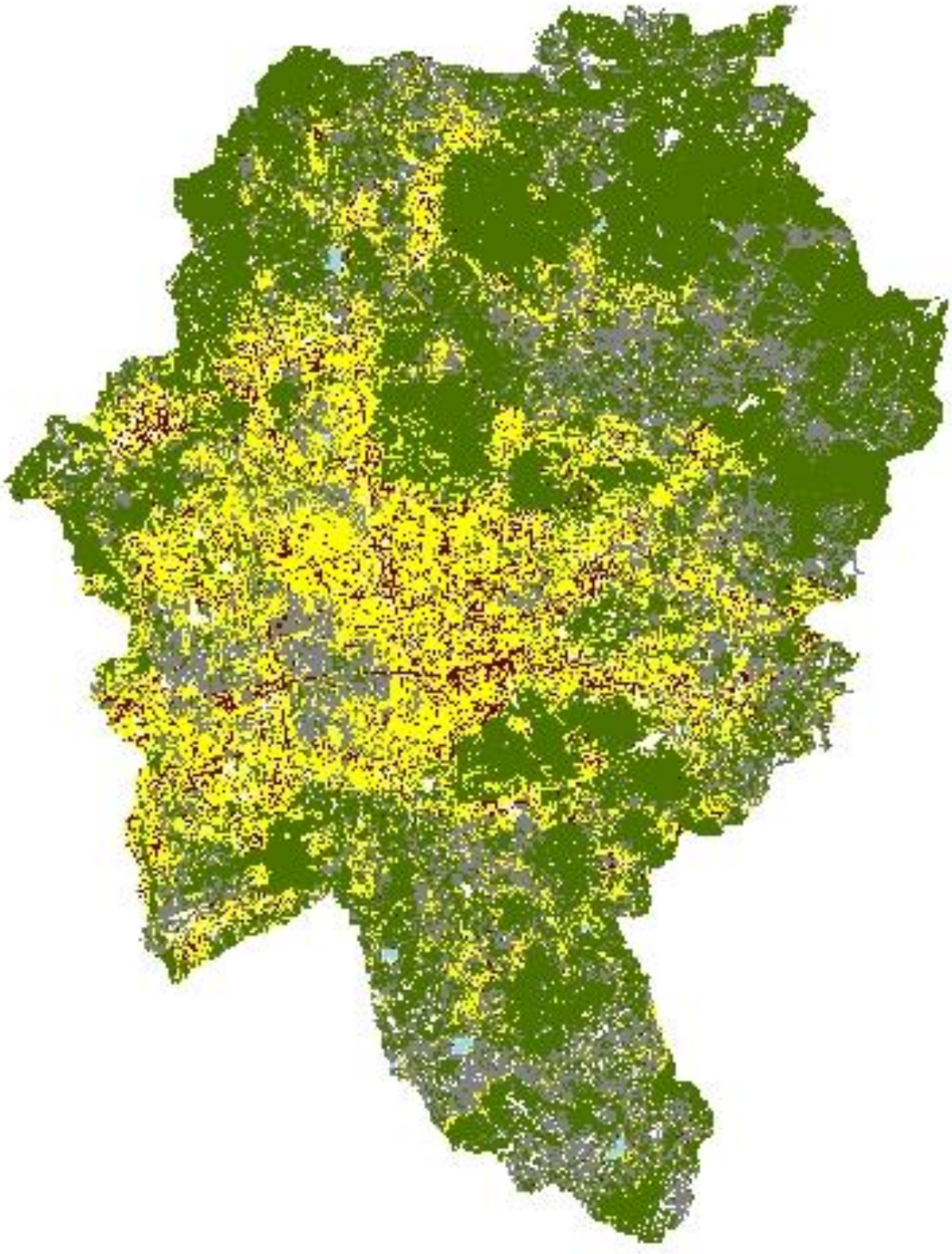


Imagen clasificada de la cuenca de Querétaro, 4 de Septiembre 2011