



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ciencias Naturales
Facultad de Ingeniería
Facultad de Psicología
Facultad de Filosofía
Facultad de Química
Facultad de Ciencias Políticas y Sociales

**DESARROLLO DE HERRAMIENTAS DE ArcGIS PARA EL CÁLCULO DE
INDICADORES FÍSICOS Y SOCIOECONÓMICOS DE CUENCAS
HIDROGRÁFICAS**

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de
Maestra en Gestión Integrada de Cuencas

Presenta:

Elda Barbosa Briones

Dirigida por:

Dr. Miguel Ángel Domínguez Cortázar

M. en C. Leticia Padilla Sánchez

Santiago de Querétaro, Qro. Octubre 2011



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ciencias Naturales
Facultad de Ingeniería
Facultad de Psicología
Facultad de Filosofía
Facultad de Química
Facultad de Ciencias Políticas y Sociales

Maestría en Gestión Integrada de Cuencas

**DESARROLLO DE HERRAMIENTAS DE ArcGIS PARA EL CÁLCULO DE
INDICADORES FÍSICOS Y SOCIOECONÓMICOS DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS**

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de
Maestro en Gestión Integrada de Cuencas

Presenta:

Elda Barbosa Briones

Dirigido por:

Dr. Miguel Ángel Domínguez Cortázar

Co-Dirigida por:

M. en C. Leticia Padilla Sánchez

SINODALES

Dr. Miguel Ángel Domínguez Cortázar
Presidente

M. en C. Leticia Padilla Sánchez
Secretario

Dr. Enrique Arturo Cantoral Uriza
Vocal

Dr. Alfredo Amador García
Suplente

Dr. Francisco Javier Peña de Faz
Suplente


Biol. Jaime Ángeles Ángeles
Director de la Facultad de Ciencias Naturales


Dr. Luis Gerardo Hernández Sandoval
Director de Investigación y Posgrado

Campus UAQ-Aeropuerto,
Querétaro, Qro.
Octubre 2011
México

RESUMEN

La cuenca hidrográfica funciona como un sistema dinámico, abierto y complejo, donde los recursos naturales son utilizados por la población de acuerdo a las actividades económicas que ahí se realizan. En los estudios de cuencas, la etapa de diagnóstico ofrece un panorama geográfico de donde están los problemas y hacia donde hay que dirigir los esfuerzos para conservar dichos recursos y elevar la calidad de vida de los habitantes. Ahora bien, contar con herramientas que ayuden a simplificar este proceso, permite a los gestores dedicar más tiempo y esfuerzo a las etapas posteriores. Por otra parte, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) en la actualidad se han convertido en una herramienta muy utilizada en muchos ámbitos, debido a que permiten el manejo espacial de los datos. Un elemento fundamental de un SIG es el software, ArcGIS es quizás el más utilizado a nivel mundial, ya que además de la funcionalidad ya integrada, es posible crear nuevas aplicaciones de acuerdo a las necesidades del usuario. El presente trabajo tuvo el propósito de desarrollar tres herramientas para ArcMap (ArcGIS Desktop) con el fin de minimizar el tiempo y costo de operación en la elaboración del diagnóstico físico y socioeconómico de una cuenca, las cuales son: Caracterización de Cuenca, Erosión Hídrica e Indicadores Poblacionales, fueron desarrolladas mediante ArcGIS Engine (ArcObjects) y un lenguaje de programación COM; y cuentan con información base con el objetivo de que el usuario proporcione los menos datos posibles. A manera de validación se seleccionaron cinco microcuencas del Estado de Querétaro, donde los resultados fueron comparados con los arrojados de manera manual; y en el caso de la herramienta de Caracterización de Cuenca también fue comparada con la extensión DetermHidro de ArcView 3.2. Los resultados fueron satisfactorios, gracias a su excelente concordancia, además de que la herramienta Indicadores Poblacionales resulta ser un producto novedoso y útil ya que ArcGIS no cuenta con este tipo de herramienta.

(PALABRAS CLAVE: cuenca, diagnóstico, SIG, herramientas, caracterización, erosión hídrica, indicadores poblacionales)

SUMMARY

The watershed works as a dynamic, open and complex system, where the natural resources are used by the people according to the local economic activities. In watershed studies, the diagnosis stage offers a geographic panorama of where the problems are located and where it is necessary to direct in order to protect the resources and improve the habitant's quality of life. Having the tools to simplify the process, allows promoters to dedicate more time and effort to the subsequent stages. Also, Geographic Information Systems (GIS), have become a very used tool in many areas, permitting spatial data management. An essential GIS element is the software; ArcGIS is one of the most used worldwide, since besides the integrated functionality, it is possible to create new applications according the user necessities. The objective of the present project was to develop three ArcMap (ArcGIS Desktop) tools with the purpose of minimizing time and costs of the physical and socioeconomic diagnoses in a watershed. These tools are: Watershed Characterization, Water Erosion and Population Indicators, which were created with ArcGIS Engine (ArcObjects) and a COM programming language and the information base with the objective of the user provides the least data possible. As validation, five micro-watersheds in the State of Queretaro were selected, and the results were compared against the manual method. The Watershed Characterization tool also was compared with the ArcView 3.2 DetermHidro extension tool. The results were excellent adequate with close accordance between the standard and newly developed tools. Moreover, the Population Indicators tool is a novel and useful product because this tool is not presently available in ArcGIS.

(Keywords: watershed, diagnosis, GIS tool, characterization, water erosion, population indicators)

DEDICATORIA

A mi esposo, Octavio, por todo su amor, apoyo y comprensión durante todo este tiempo.

A mis padres, María L. y Jesús (†), por darme la vida y que a pesar de las tempestades siempre me apoyaron y guiaron para seguir adelante.

A mis hermanos, Julián, Esther y Olivia, por haber estado donde yo también debí hacerlo.

A mis abuelos, Juana y Julián, que a pesar de ya no estar aquí, me enseñaron muchos valores.

AGRADECIMIENTOS

Existe un sin fin de personas a las cuales quiero agradecer el apoyo que me brindaron a lo largo de este trabajo y de la maestría, mil gracias a todos.

En primero lugar, quiero agradecer a la Maestría en Gestión Integrada de Cuencas de la Facultad de Ciencias Naturales de la UAQ por haberme dado la oportunidad de pertenecer a la octava generación; al igual que a todos mis profesores y compañeros por brindarme una nueva perspectiva del complejo mundo de las cuencas.

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca otorgada para la realización de esta maestría.

Al Dr. Miguel Ángel Domínguez Cortázar por llevar la dirección de mi tesis; por la confianza depositada en mí, gracias por la disponibilidad, el tiempo y la paciencia que me brindo en las múltiples asesorías.

A mi Co-Directora, la M. C. Leticia Padilla Sánchez por ser mi guía y apoyo moral en este trabajo, y que a pesar de sus mil ocupaciones siempre estuvo dispuesta a ayudarme y darme su asesoría a pesar de que no obtendría ningún crédito. Lety, muchisimas gracias.

Al Dr. Francisco Peña, que siempre me apoyó e impulsó a realizar este sueño. Doctor un honor tenerlo como parte de mi comité de tesis, mil gracias.

Al Dr. Alfredo Amador García, por su valiosa aportación en este trabajo y por la confianza que deposito en mí al formar parte de mi comité de tesis.

Al Dr. Enrique Arturo Cantoral Uriza por transmitirme esa confianza, creer en mí y en mi trabajo, por sus correcciones tan puntuales y por su permanente disposición.

A las próximas M. en C. Nydia Margarita Rivas Casas y Leticia Félix Cuencas, fuente de inspiración de que todo se puede lograr a pesar de las múltiples ocupaciones y compromisos. Gracias por su amistad y apoyo, las quiero.

Al futuro Doctor, Luis Enrique Granados Muñoz, por creer en mí y dedicar el tiempo en asesorarme en mis trabajos al inicio y durante esta travesía; muchas gracias amigo.

A mis amigos, compañeros y colegas cuenqueros de la octava generación de la MAGIC: Nydia, Lety, Tereso (Luis Enrique), Ricardo, Judith, Male, Lili, Juanito, José Luis, Ariel, Cacher (Luis Felipe), Sponsor (Alejandro), Lalo, Tania y Alicia; que de alguna forma todos aprendimos de todos.

Al Dr. Germán Santacruz de León, por sus asesorías y por haberme proporcionarme material muy útil en este trabajo.

Mi eterno agradecimiento a mi esposo, mis padres y mis hermanos, quienes siempre han aguantado mi abandono para que logre mis sueños y a todas y cada una de aquellas personas que siempre me alentaron y me escucharon en momentos difíciles y a las que dedicaron una oración por mí.

Mil Gracias

CONTENIDO

RESUMEN	I
SUMMARY	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTOS	IV
CONTENIDO	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABLAS	X
ÍNDICE DE FÓRMULAS	XI
INTRODUCCIÓN	1
JUSTIFICACIÓN	8
OBJETIVOS	9
1.1. Objetivo General	9
1.2. Objetivos Particulares	9
CAPÍTULO I. ANTECEDENTES	11
1.1. Programas para SIG	12
1.2. Programas para hidrología dentro de los SIG	14
1.3. Programas para erosión dentro de los SIG	17
1.4. Herramientas para obtener indicadores poblacionales	17
1.5. Herramientas desarrolladas para casos específicos	19
1.6. Desarrollo de herramientas y casos de estudio con SIG en México	21
CAPÍTULO II. SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA Y ARCGIS	24
2.1. Los SIG's como herramientas informáticas	24
2.1.1. Componentes de un SIG	26
2.1.2. Funciones de los SIG	28
2.1.3. Funcionamiento de los SIG	29
2.1.4. Alcances de los sistemas de información geográfica	30
2.1.5. Tecnologías relacionadas con los SIG	31
2.1.6. Aplicaciones de los sistemas de información geográfica	31
2.2. ArcGIS	32
2.2.1. ArcGIS Desktop	34

2.2.2.	ArcGIS Engine	34
2.2.3.	ArcGIS Server	35
2.2.4.	ArcGIS Online	35
2.2.5.	ArcGIS Mobile	36
2.2.6.	ArcGIS Free	36
2.2.7.	ArcObjects	37

CAPÍTULO III. MARCO TEÓRICO PARA EL DESARROLLO DE HERRAMIENTAS PARA ARCGIS 39

3.1.	Definición de cuenca hidrográfica	39
3.2.	Tipos de cuencas.....	41
3.3.	Clasificación de una cuenca.....	42
3.4.	Características morfológicas de la cuenca	44
3.4.1.	Área de la cuenca (A)	45
3.4.2.	Perímetro de la cuenca (P)	45
3.4.3.	Coeficiente de Compacidad o índice de Gravelius (Kc)	46
3.4.4.	Longitud de cuenca (L)	46
3.4.5.	Longitud de cauce (Lc).....	46
3.4.6.	Factor de forma (Kf)	47
3.4.7.	Orden de corriente de una cuenca.....	47
3.4.8.	Densidad de drenaje (Dd)	48
3.4.9.	Densidad hidrográfica o de corriente (Dh)	48
3.4.10.	Elevación máxima	49
3.4.11.	Elevación media.....	49
3.4.12.	Elevación mínima.....	49
3.4.13.	Pendiente media	49
3.4.14.	Curva Hipsométrica.....	50
3.5.	Estimación del grado de erosión hídrica de una cuenca.....	51
3.5.1.	Ecuación Universal de Pérdida de Suelo	52
3.6.	Indicadores Poblacionales	61
3.6.4.	Porcentaje de ocupantes en viviendas particulares sin disponibilidad de energía eléctrica en una cuenca (I_{see}).....	68
3.6.5.	Porcentaje de ocupantes en viviendas particulares sin disponibilidad de agua entubada en una cuenca (I_{sae})	68
3.6.6.	Porcentaje de ocupantes en viviendas particulares con algún nivel de hacinamiento en una cuenca (I_{nh})	69

CAPÍTULO IV. PROGRAMACIÓN DE UNA BARRA DE HERRAMIENTAS DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS PARA ARCMAP (ARCGIS DESKTOP) 71

4.1.	Calidad de la Información	72
4.2.	Información base.....	73
4.3.	Correspondencia espacial de la información	74

4.4. Programación de las herramientas	75
4.4.1. Caracterización de Cuenca.....	76
4.4.2. Erosión Hídrica	84
4.4.3. Indicadores Poblacionales	90
CAPÍTULO V. VALIDACIÓN DE "CH-CEHIP"	95
5.1. Selección de microcuencas	95
5.2. Aplicación de la herramienta "Caracterización de Cuenca"	97
5.3. Aplicación de la herramienta "Erosión Hídrica"	103
5.4. Aplicación de la herramienta "Indicadores Poblacionales" a cinco microcuencas del Estado de Querétaro	104
5.4.1. Análisis de cuencas vecinas	107
CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	110
REFERENCIAS.....	112
ANEXOS	119
A1. MANUAL DE INSTALACIÓN	120
A2. MANUAL DE USUARIO	127

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. ArcGIS.....	33
Figura 2. El sistema ArcGIS.	37
Figura 3. Fases de una cuenca representadas por la curva hipsométrica	50
Figura 4. Mapa de regiones con igual erosividad en la República Mexicana. Cortés (1991).	54
Figura 5. Diagrama de procesos de la herramienta "Caracterización de Cuenca" 77	
Figura 6. Casos de sumideros en un grid.....	79
Figura 7. Valores de dirección de flujo	81
Figura 8. Diagrama de procesos de la herramienta "Erosión Hídrica"	87
Figura 9. Diagrama de procesos de la herramienta "Indicadores Poblacionales" .	91
Figura 10. Microcuencas seleccionadas para validación.	96
Figura 11. Red de drenaje de las cinco microcuencas seleccionadas generada por "Caracterización de cuenca".	97
Figura 12. Comparación de la red de drenaje de la microcuenca La Joya.....	99
Figura 13. Acercamiento a la red de drenaje de la microcuenca La Joya.	99
Figura 14. Resultados de la herramienta "Erosión Hídrica" en las microcuencas seleccionadas.....	103
Figura 15. Gráfica de resultados de la herramienta "Indicadores Poblacionales".	106
Figura 16. Cuencas vecinas a Corral Blanco.	108

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de las cuencas de acuerdo a la superficie.....	42
Tabla 2. Clasificación del grado de erosión.....	52
Tabla 3. Ecuaciones para estimar la erosividad de la lluvia “R” en la República Mexicana.	54
Tabla 4. Valores de K en función de la unidad del suelo y su textura superficial. .	56
Tabla 5. Valores de m en función de la pendiente del terreno	57
Tabla 6. Valores para el factor C.....	60
Tabla 7. Valores para el factor P.....	61
Tabla 8. Datos de proyección de la información.....	75
Tabla 9. Estaciones climatológicas	86
Tabla 10. Microcuencas seleccionadas para validación.....	95
Tabla 11. Significado de variables.....	100
Tabla 12. Resultados a partir de tres métodos.....	101
Tabla 13. Tabla de resultados de la comparación de DermHidro y CH-CEHIP ..	102
Tabla 14. Número de localidades por microcuenca	104
Tabla 15. Resultados de los parámetros (con la herramienta y manualmente) ..	105
Tabla 16. Análisis de cuencas vecinas.....	109

ÍNDICE DE FÓRMULAS

Fórmula 1. Coeficiente de compacidad.....	46
Fórmula 2. Factor de forma.....	47
Fórmula 3. Densidad de drenaje.....	48
Fórmula 4. Densidad hidrográfica o de corriente.....	48
Fórmula 5. Relación Dh y Dd.....	49
Fórmula 6. Ecuación Universal de Pérdida de Suelo.....	53
Fórmula 7. Longitud.....	57
Fórmula 8. Grado de pendiente (S).....	58
Fórmula 9. Tasa de crecimiento demográfico.....	66
Fórmula 10. Densidad de población de una cuenca.....	66
Fórmula 11. Porcentaje de ocupantes en viviendas particulares sin drenaje ni servicio sanitario en una cuenca.....	67
Fórmula 12. Porcentaje de ocupantes en viviendas particulares sin disponibilidad de energía eléctrica en una cuenca.....	68
Fórmula 13. Porcentaje de ocupantes en viviendas particulares sin disponibilidad de agua entubada en una cuenca.....	69
Fórmula 14. Porcentaje de ocupantes en viviendas particulares con algún nivel de hacinamiento en una cuenca.....	70

INTRODUCCIÓN

Las disciplinas de la Ingeniería, requieren de una actualización continua en sus diversas especialidades; por lo que es importante contar con los cambios y los avances técnicos que involucren nuevas formas que puedan demostrar el análisis y visualización de la integración de datos. Esta recopilación de información, trata de integrar los aspectos relacionados con los componentes del ciclo hidrológico (parámetros de infiltración), la obtención de datos, las técnicas de predicción de precipitación y escurrimientos, el rendimiento de las cuencas y sus interrelaciones con el agua subterránea (zonas de recarga), así como contar con los cambios en el manejo de la información que involucran nuevas formas para analizar, visualizar e integrar los datos que den soluciones a problemas regionales que den respuestas más inmediatas.

Las ciencias hidrológicas tienen un lugar muy importante en el análisis de los recursos naturales. El agua como recurso, especialmente el del agua dulce están sujetos a un intenso aprovechamiento y especulación. Como recurso, el agua parece ilimitado, sin embargo en el siglo veinte se ha incrementado tremendamente su uso, tanto como la amenaza a la contaminación.

Por otra parte, la mayoría de los rasgos que podemos visualizar en el paisaje, forman o formaron parte de un sistema de drenaje complejo donde el agua fue el instrumento modelador. Estos sistemas aportan una cantidad significativa del agua que se precipita sobre la superficie y la conduce corriente abajo hasta llegar al mar, lo que contribuye a tener un conocimiento hidrológico global de la zona, ya que en la actualidad los recursos hídricos se han visto afectados en su garantía primaria.

En cuanto a las herramientas para cuantificar el recurso agua, en el pasado la utilización de un modelo hidrológico no era una tarea sencilla, ya que requería de una serie de datos no disponibles fácilmente. Hoy día, esto se ha reducido a

simulaciones hidrológicas hechas por programas de computación en donde las teorías hidrológicas resultan de gran utilidad en la exploración del agua tanto superficial como subterránea, ya que pueden aportar información acerca de la cantidad de agua útil para la recarga de los acuíferos, de la facilidad con que se produce la misma y de la localización y cuantificación del volumen de agua subterránea que se descarga en la superficie. La cantidad de agua útil para la recarga, está íntimamente ligada con la precipitación, así como con las aguas superficiales que circulan en corrientes permanentes. En general el cuidado y protección del agua depende en mucho de las condiciones hidrológicas que priven en una región ya que en función de éstas habrá una mayor o menor recarga útil. Por ejemplo, una región desértica tendrá menos posibilidades en cuanto a la existencia de agua subterránea, que las que tenga una región húmeda, aunque en ambas el medio geológico sea similar.

La mayor parte de las aplicaciones importantes de la hidrología requieren de un firme entendimiento de los principios básicos de la física y de la química del agua. La hidrología utiliza las ciencias básicas y las matemáticas para dar explicación al desarrollo de los fenómenos observados. Su problema fundamental es la descripción e identificación de la trayectoria que sigue el movimiento del agua sobre y por debajo de la superficie de la tierra en un ambiente natural, utilizando los modelos matemáticos para describir cuantitativamente este movimiento. Lo anterior obedece al objetivo primario de la hidrología, pero el desarrollo demográfico en el mundo y el empleo de nuevas tecnologías (cambios en la industria) ha originado que la disponibilidad del agua se vea afectado, sobre todo en el agua de consumo, además de presentar contaminación, que en algunos casos incluye una gran variedad de compuestos orgánicos y metales, así como la acidificación del agua superficial por lluvia ácida, La capacidad de los ríos, arroyos, lagos y estuarios para diluir contaminantes, para proteger niveles y para purificar el agua a través de procesos naturales (capacidad asimilativa), depende de la cantidad de agua que fluye en ellos.

Sin embargo, para entender la dinámica de los flujos de agua, así como su contaminación, es necesario acotar el estudio en un espacio limitado donde los distintos procesos hidrológicos tienen lugar, dicho espacio es la llamada cuenca hidrográfica. Para estudiar una cuenca se requiere de un acervo teórico y de metodologías hidrológicas adecuadas para entender su funcionamiento y las implicaciones hidrológicas y socioeconómicas que en ella ocurren, lo que argumenta un manejo adecuado de sus recursos naturales.

La cuenca hidrográfica es considerada la unidad básica de estudio y se define como una zona de la superficie terrestre tal que, si fuera impermeable todas las gotas de lluvia que caen sobre ella, tienden a ser drenadas por un sistema de corrientes hacia un mismo punto de salida (Domínguez, 2006). También se le puede entender como el área de la superficie terrestre por donde el agua de lluvia escurre y transita a través de una red de drenaje que fluye hacia una corriente principal y por ésta hacia un punto común de salida que puede ser un almacenamiento de agua interior, como un lago, una laguna o el embalse de una presa o puede llegar hacia el mar¹.

La cuenca hidrográfica es también un espacio geográfico, hidrológico, económico-social y ambiental delimitado hidrográficamente por escurrimientos fluviales en una determinada área, cuyas zonas de pequeña irrigación son variables. Hacia adentro, su estructura social está conformada por las familias que integran la comunidad; hacia fuera, se complementa con ámbitos naturales, como la cuenca o ámbitos político-administrativos, como los municipios y gobiernos estatales. En ninguna situación estos ámbitos son excluyentes, es decir, son espacios habitados por cierto número de familias que utilizan y manejan los recursos naturales del área: agua, suelo, vegetación y fauna. En estos espacios se planifica el uso y manejo de los recursos naturales, buscando el desarrollo sustentable de los sistemas de producción, es decir, la cuenca concilia e integra los objetivos de producción y protección de los recursos naturales; ella permite y

¹ *Ibíd*

facilita el establecimiento de un proceso productivo organizado, para generar una escala de producción que pueda acceder a mercados que exigen cantidad, calidad y continuidad (FIRCO, 2005).

La delimitación de una cuenca establece una etapa básica en el proceso de gestión de los recursos naturales y socioeconómicos, además de que permite obtener una visión general de los diversos aspectos biofísicos y socioeconómicos. Ahora bien, es de suma importancia contemplar los ámbitos físico, económico y social como una unidad de estudio en la gestión integrada de cuencas para lograr la preservación y mejor aprovechamiento de los recursos naturales con la organización conjunta de la población.

Dentro de los estudios integrados de cuencas existe la necesidad de realizar la caracterización hidrológica, donde “el diagnóstico es la fase para conocer, interpretar, analizar y realizar una evaluación previa de la cantidad y calidad de lo que existe en el ámbito de la microcuenca. De identificar a detalle el potencial y aptitud de los recursos naturales, materiales, humanos y financieros con que se cuenta; así como, análisis y la interpretación que los habitantes tienen en cada uno de ellos” (FIRCO, 2005). Dicha caracterización, permite conocer la geomorfología de la unidad de estudio, definir preliminarmente su comportamiento hidrológico, estimar el grado de erosión hídrica y definir acciones para hacer obras de conservación o rehabilitación del suelo, entre otros análisis de tipo técnico; pero además, permite conocer algunos de los indicadores poblacionales más importantes como: la tasa de crecimiento demográfico, la densidad demográfica y condicionantes como los porcentajes de ocupantes en viviendas particulares sin drenaje ni servicios sanitarios, porcentaje de ocupantes en viviendas particulares sin disponibilidad de energía eléctrica, porcentaje de ocupantes en viviendas particulares sin disponibilidad de agua entubada y porcentaje de ocupantes en viviendas particulares con algún nivel de hacinamiento, estos últimos con los datos estadísticos obtenidos de los censos de población del país.

La información que se obtiene en estas fases de estudios debe estar fundamentada en una base técnica que requiere de herramientas informáticas para su integración y proceso, la cual es un instrumento fundamental en la toma de decisiones.

Usualmente los gestores de cuencas son los encargados de preparar la información solicitada, sin embargo, es común su falta de experiencia en el uso de software especializado para hacer la caracterización hidrológica, o para estimar el grado de erosión hídrica de una cuenca y, el no contar con herramientas dentro de los programas de computación que les facilite obtener indicadores poblacionales, relacionados a población y vivienda, de una forma rápida y eficaz eliminando una serie de pasos que consume mucho tiempo frente a la computadora. Por tanto, se requiere de un conjunto de herramientas (caracterización de cuenca, grado de erosión hídrica e indicadores poblacionales) que permita hacer de manera conjunta las tareas mencionadas, lo que proporciona ventajas de ahorro de tiempo y esfuerzo, ya que se evita hacer diversos cálculos que en ocasiones se hacen manualmente por el desconocimiento del proceso a seguir en el manejo del software que se está usando.

El estudio de una cuenca es un proceso largo, requiere de la participación activa del gestor y de los habitantes, lo que origina la necesidad de recopilar una gran cantidad de información.

Dentro de la información requerida de manera general se encuentra la recopilación de antecedentes de órganos de gobierno, la caracterización hidrológica, un censo de la fauna que habita en la cuenca, un censo de aprovechamientos hídricos superficiales y subterráneos y, la realización del marco biofísico de la cuenca (clima, fisiografía, geología, vegetación, suelos), este último permite además hacer un diagnóstico del uso actual y potencial de las especies.

A la par, se realiza un marco social como antecedentes históricos; un análisis de la población, edades, sexo, ocupación, educación, servicios públicos, salud, infraestructura urbana e hidráulica, alimentación, organización, vivienda y religión, entre otros. Adicionalmente un marco económico que incluya la población económicamente activa, las actividades económicas más importantes de la región, la tenencia de la tierra, migración, ingresos, empleo, etcétera. Donde la recopilación de información pueda ser mediante las dependencias de gobierno (SEMARNAT, FIRCO, CONAGUA. etcétera) e instituciones oficiales como INEGI y corroborando los datos directamente con la gente de la cuenca.

Todo el despliegue de información y su concentración ha implicado un gran avance en el uso de la computadora en el desarrollo de los estudios de cuencas, más aún el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) porque permiten desarrollar herramientas acordes a las necesidades del usuario.

Actualmente el software GIS más usado a nivel mundial es el ArcGIS, desarrollado por ESRI (Environmental System Research Institute, compañía fundada en 1969), ya que tiene un potencial enorme, que además permite la creación de nuevas herramientas en un entorno de desarrollo Visual Basic Application, que está integrado en el software o incluso con el uso de alguna tecnología COM (Component Object Model) de Microsoft (JAVA, C++, C#), ambos mediante ArcObjects.

ArcGIS es un paquete que utiliza un formato estándar en los SIG llamado shapefile que se puede importar y exportar en un gran número de software SIG, lo que lo hace fácil de usar y es utilizado en los diferentes niveles de gobierno de nuestro país (federal, estatal y municipal), así como un gran número de universidades y usuarios del sector privado.

Debido a la facilidad que ofrece este programa, y con la intención minimizar el tiempo en la operación de cálculos frente a la computadora para obtener la

caracterización hidrológica, estimar el grado de erosión hídrica (en el marco biofísico) y los indicadores poblacionales, lo que implicaría ahorro en el consumo de grandes sumas de dinero comprando extensiones que no resultan fáciles de aprender; se decidió realizar tres herramientas en ArcGIS para el apoyo de estas tareas, con ello se busca ayudar a los gestores y realizadores de estudios de cuencas, permitiendo que dediquen más tiempo a la gestión participativa en la cuenca eficientando más su trabajo.

Así, el desarrollo de estas herramientas tiene como fin automatizar los procesos de caracterización hidrológica y la estimación de la erosión hídrica en el marco biofísico de las cuencas, así como de indicadores poblacionales tales como la tasa de crecimiento, densidad de población, porcentaje de ocupantes en viviendas particulares sin drenaje ni servicios sanitarios, porcentaje de ocupantes en viviendas particulares sin disponibilidad de energía eléctrica, porcentaje de ocupantes en viviendas particulares sin disponibilidad de agua entubada y porcentaje de ocupantes en viviendas particulares con algún nivel de hacinamiento.

JUSTIFICACIÓN

En el estudio de una cuenca hidrográfica resulta indispensable realizar un diagnóstico en el marco físico, social y económico para conocer, interpretar y analizar las condiciones en las que se encuentra el área de trabajo; tales como la caracterización de los aspectos geomorfológicos, la estimación del grado de erosión hídrica e indicadores poblacionales.

Este diagnóstico es realizado por los gestores de cuencas, los cuales requieren del conocimiento de herramientas informáticas que les permita simplificar el trabajo y que sean de fácil adquisición ya que el alto costo en el mercado no favorece obtenerlas y dado que unos de los software's más potentes en cuanto a sistemas de información geográfica es el ArcGIS, surgió la idea de realizar tres herramientas que permitan realizar la caracterización de una cuenca, la estimación del grado de erosión hídrica y calcular algunos indicadores poblacionales.

OBJETIVOS

1.1. Objetivo General

Desarrollar tres herramientas para el software ArcGIS v. 9.x que minimice el tiempo y costo de operación de los estudios de cuencas, la primera para la caracterización hidrológica, la segunda para estimar el grado de erosión hídrica de una cuenca y finalmente la tercera para calcular indicadores poblacionales como la tasa de crecimiento, densidad de población, porcentaje de ocupantes en viviendas particulares sin drenaje ni servicios sanitarios, porcentaje de ocupantes en viviendas particulares sin disponibilidad de energía eléctrica, porcentaje de ocupantes en viviendas particulares sin disponibilidad de agua entubada y porcentaje de ocupantes en viviendas particulares con algún nivel de hacinamiento.

1.2. Objetivos Particulares

1. Desarrollar una herramienta para calcular las variables físicas de la caracterización relacionadas con las cuencas: área, perímetro, coeficiente de compacidad, longitud de cuenca, longitud del cauce principal, factor de forma, orden de corriente, densidad de drenaje, densidad de corriente, elevación máxima, media y mínima, pendiente media; así como, graficar la curva hipsométrica.
2. Desarrollar una segunda herramienta que estime el grado de erosión hídrica de una cuenca.
3. Desarrollar una tercera herramienta donde se realicen los cálculos de los indicadores poblacionales como son la tasa de crecimiento, densidad de población, porcentaje de ocupantes en viviendas particulares sin drenaje ni

servicios sanitarios, porcentaje de ocupantes en viviendas particulares sin disponibilidad de energía eléctrica, porcentaje de ocupantes en viviendas particulares sin disponibilidad de agua entubada y porcentaje de ocupantes en viviendas particulares con algún nivel de hacinamiento.

4. Realizar la fase de validación en cinco cuencas para comprobar los resultados arrojados con las herramientas desarrolladas y los obtenidos de manera tradicional.
5. Elaborar el manual de instalación de las herramientas.
6. Elaborar el manual de usuario para la barra de herramientas que contiene: caracterización de cuenca, estimación del grado de erosión hídrica e indicadores poblacionales.

CAPÍTULO I. ANTECEDENTES

El continuo avance de las computadoras en las últimas décadas ha dado pie al desarrollo de nuevas y múltiples aplicaciones tecnológicas, entre ellas los Sistemas de Información Geográficas (SIG o GIS, por las siglas en inglés Geographic Information System). Estas aplicaciones permiten integrar y analizar gran cantidad de información espacial que anteriormente era difícil ya que se tenía que hacer regularmente de manera manual.

El surgimiento del que se considera el primer SIG tuvo su origen en Canadá con el nombre de Canadian Geographic Information System (CGIS) en 1964, bajo la dirección del *Dr. Roger Tomlinson*, a quien se le considera hoy el padre de la tecnología SIG (GIS Wold, 1996). Sistema realizado para el Ministerio de Agricultura de Canadá con la finalidad de servir de apoyo en la realización del inventario forestal del país.

La tecnología SIG ha sido aplicada en diversos campos de conocimiento y obteniendo múltiples resultados, por lo que se ha considerado una herramienta importante para la integración y el análisis de grandes cantidades de información geográfica. Su utilización ha sido fundamental para llevar a cabo los estudios en el campo de la evaluación de los recursos naturales, medio ambiente y geomorfología (López, 2005).

El concepto de Sistemas de Información Geográfica se emplea regularmente a la tecnología computacional orientada hacia cuestiones geográficas, también se llama a los conceptos y estructuras lógicas de manejo de entidades espaciales o geográficas (programas) usados en diferentes áreas de aplicación, y más recientemente, a un cuerpo organizado de conocimientos sistemáticos sobre las diversas formas de guardar, integrar, consultar, analizar y actualizar la información acerca de entidades geográficas. Estos conceptos

caracterizan la conformación de una disciplina científica nueva, relacionada con los aspectos tecnológicos, pero también con el establecimiento de teorías sobre el análisis espacial y de los medios para llegar a hacerlo (Maguire, 1991).

Para el análisis y procesamiento de la información espacial existen infinidad de programas (software) SIG, más específicamente herramientas para modelar y analizar información relacionada con los estudios de cuencas y los elementos que la integran, como por ejemplo la hidrología, la erosión y los indicadores poblacionales.

Tanto las actividades de modelado hidrológico como del cálculo de la erosión potencial en cuencas hidrográficas suelen hacerse en conjunto con un MDE ², implementado en programas comerciales y con ayuda de modelos matemáticos.

1.1. Programas para SIG

ArcView es un producto del Environmental Systems Research Institute (ESRI), los fabricantes de ARC/INFO, el más importante software de sistemas de información geográfica en el mundo.

En la versión 3.X de ArcView (hoy en día se considera que esta herramienta es ya obsoleta) y anteriores es posible obtener algunos parámetros importantes en la caracterización de cuencas, además de existir extensiones útiles para cálculos hidrológicos.

Después de ARC/INFO versión 7, ESRI ha sufrido un cambio importante en la familia de productos SIG cuando lanzó ArcGIS 8.0 a finales de 1999. Con este lanzamiento, ARC/INFO se suspendió y su base de código fue congelada. ArcGIS

² Modelo Digital de Elevación

es una arquitectura multi-escala, con la liberación del producto Desktop (de escritorio) a tres niveles de licencias: ArcView, ArcEditor, y ArcInfo.

ArcInfo es el SIG de escritorio más completo. Incluye todas las funcionalidades de ArcEditor y ArcView y añade una avanzada herramienta de análisis espacial, amplia manipulación de datos y herramientas de cartografía.

IDRISI es un Sistema de Información Geográfica (SIG) de estructura raster desarrollado por la Escuela de Post-Grado en Geografía, de la Universidad de Clark, en Worcester, Massachusetts, EE.UU. Es un SIG de bajo costo, de tipo no comercial y está diseñado para ofrecer herramientas profesionales y geográficas en el análisis espacial, donde se puede hacer estudios en los ámbitos de la hidrología y la erosión.

Existen centros dedicados a la capacitación y divulgación del software de IDRISI a la comunidad académica y profesional. Uno de estos centros es el que se fundó a finales del 2003, en la Universidad Autónoma del Estado de México, llamado Centro de Recursos Idrisi-México ubicado en el Centro Interamericano de Recursos del Agua (CIRA).

El Centro de Recursos Idrisi dispone de un módulo de Agua-Población para la implementación geomática de evaluación donde propone el Índice de Evaluación Agua-Población (IEAP), mismo que integra el Índice de Presión Demográfica sobre el Agua (IPDA) y el Índice de Condición de Uso del Agua (ICUA), los cuales son calculados a su vez por integrar los distintos indicadores e índices hídricos tanto de características demográficas como de uso del agua.

ERDAS IMAGINE (ERDAS Inc). Conocido paquete de tratamiento de imágenes de satélite y teledetección. Su formato principal tiene extensión img, y su formato comprimido es el ECW (Enhanced Compressed Wavelet). Realiza avanzadas funciones de teledetección y análisis de modelos espaciales para crear

nueva información. Además, con ERDAS IMAGINE, puede visualizar sus resultados en 2D, 3D, películas y composiciones de mapa cartográfico de calidad.

1.2. Programas para hidrología dentro de los SIG

Hydrology Modeling. Es una extensión de ArcView que junto con la extensión Spatial Analyst permite calcular algunas características de las cuencas, como el área, el perímetro, la longitud, el factor de forma, entre otras, donde el usuario debe, con distintas herramientas, realizarlo paso a paso y llevando un orden, por lo que es posible incurrir en errores si no se tiene pleno conocimiento del uso de la extensión (ESRI 2010).

ArcInfo, dentro de la extensión Spatial Analyst incluye una herramienta llamada Hydrology que ayuda a obtener información hidrológica a partir de un modelo digital de elevación.

ArcHydro es un sistema basado en ArcGIS orientado a aplicaciones de recursos hídricos. Consta de dos componentes: ArcHydro Data Model y ArcHydro Tools. Es un sistema de información hidrológica, que se traduce como un sistema de cómputo que sirve de apoyo en la planeación y manejo del recurso agua. ArcHydro es una extensión adicional que puede agregarse al ArcInfo.

RIVER TOOLS es una aplicación de SIG para el análisis y visualización de información de terreno, divisorias de cuencas y redes de drenaje, proveyendo las herramientas y comandos necesarios para generar un modelo hidráulico en 1D en base a modelos de digital de elevación, siendo ésta su principal característica. Dentro de las herramientas disponibles se encuentran delimitación de cuencas, definición de cauces y órdenes de los drenes identificados, generación de perfiles y su respectiva caracterización (Becerra, 2009).

HIDRO_SIG es una herramienta para la estimación de balances hidrológicos de Colombia, un sistema de información geográfico para la estimación, despliegue, análisis y consulta interactiva de las variables más importantes del ciclo hidrológico en Colombia, tales como precipitación, evaporación potencial y real y escorrentía, tanto a nivel anual como mensual. Es un SIG flexible y versátil para la estimación hidrológica en cuencas con y sin medición, ya que permite estimar los caudales promedio de largo plazo en cualquier punto de la hidrología Colombiana, usando la metodología de balance hídrico de largo plazo (Mesa *et al.*, 1999). (la ventaja es el acceso total al código fuente).

CUENCAS programa desarrollado para la estimación del caudal medio. El programa CUENCAS esta diseñado para el análisis de cuencas hidrológicas obtenidas a partir de modelos digitales de terreno y para la extracción de información hidrológica a escala de cuenca, con el objeto de estimar los balances hídricos³.

AGNPS (2001). Agricultural Nonpoint Source Pollution Model. Este modelo fue desarrollado por el Departamento de Agricultura de EE.UU. (USDA). Es una actualización del AGPNS98, incorpora modificaciones que mejoran la capacidad del programa y automatiza muchos de los pasos para la entrada de datos (inputs). Este modelo incorpora al sistema hidrológico.

ARSP. Modelo de simulación de sistemas hidrológicos complejos constituidos por un elevado número de lagos y embalses interconectados por cauces naturales o canales (Miliarium Aureum, 2001,2004).

EPANET. Simulation of Hydraulic and Water Quality Behaviour Within Pressurized Pipe Networks. Simulación del comportamiento hidráulico y calidad química de redes de distribución de agua. Existe la versión 2.0 inglesa, portuguesa y española, la cual fue traducida por el Prof. Fernando Martínez Alzamora,

³ Ídem

responsable del grupo IDMH del Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia (España), con la colaboración de D. Hugo Bartolín Ayala (Miliarium Aureum, 2001,2004).

FEFLOW. Modelo de simulación de aguas subterráneas bi y tridimensional, basado en el método de los elementos finitos (Miliarium Aureum, 2001,2004).

GMS. Ground Water Modeling System. Modelo de simulación tridimensional de aguas subterráneas (Miliarium Aureum, 2001,2004).

HSPF. Hydrological Simulation Program – FORTRAN (Miliarium Aureum, 2001,2004).

MOUSE. Sistema integrado de diseño y modelización de sistemas de escorrentía superficial, canales y redes de conducciones que permite acometer estudios de calidad de aguas, transporte de sedimentos y diseño de redes de pluviales y saneamiento (Miliarium Aureum, 2001,2004).

MOUSE GIS. Utilidad que permite vincular los programas MOUSE y MIKE SWMM con sistemas GIS para facilitar el análisis e interpretación de redes de pluviales y de saneamiento (Miliarium Aureum, 2001,2004).

RiverCAD. Entorno gráfico avanzado de modelización de sistemas hidrológicos basado en un sistema tipo CAD con conexión con los programas HEC-2 y HEC-RAS (Miliarium Aureum, 2001,2004).

RMS. Modelo de simulación de curvas de remanso que permite el análisis de puentes, canales, llanuras de inundación y otros sistemas hidrológicos. Utiliza los programas HEC-2 y HEC-RAS y trabaja en el entorno de AutoCAD (Miliarium Aureum, 2001,2004).

TR-55. Simulación y análisis de los procesos de precipitación y escorrentía (Miliarium Aureum, 2001,2004).

HEC-RAS. Simulación hidráulica aplicada. Permite realizar cálculos unidimensionales para un sistema hidráulico natural (un río) o para canales construidos (Miliarium Aureum, 2001,2004).

TOPMODEL. Integrado con el programa SIG/MDT de dominio público GRASS (elaborado por el Cuerpo de ingenieros del Ejército norteamericano) (Miliarium Aureum, 2001,2004).

1.3. Programas para erosión dentro de los SIG

RUSLE. Cálculo de Erosión. Es una extensión para ArcView 3.x que junto con Spatial Analyst calcula la erosión a través de un modelo digital de elevación. Es un modelo provincial y experimental que no fue validado (ESRI, 2010).

CartErosion. Extension de ArcView 3.x que automatiza el proceso para la elaboración de mapas de riesgo de erosión a nivel de cuencas (ESRI, 2010).

AGNPS (2001). Agricultural Nonpoint Source Pollution Model. Este modelo incorpora, al igual que el sistema hidrológico, la erosión y el transporte de compuestos químicos.

1.4. Herramientas para obtener indicadores poblacionales

POPULUS. Simulación de dinámica poblacional. Es un programa muy fácil de usar que permite aplicar los conocimientos sobre modelos poblacionales (crecimiento y fluctuación de poblaciones individuales e interacción de poblaciones) y comprender estructura y funcionamiento.

Base de Datos de Población de América Latina y El Caribe (ALC). El proyecto contribuye a lograr la meta que tienen varias organizaciones de investigación y desarrollo de proporcionar mapas digitales de población para la mayoría de países en desarrollo en la región. Este proyecto se ciñe, en la medida de lo posible, al diseño y metodología del desarrollado previamente con las bases de datos de Asia y África (Deichmann 1994, 1996a).

SPECTRUM. Es un sistema de modelos políticos integrados desarrollado en ambiente Windows. La integración se centra en el programa DemProj, usado para calcular las proyecciones de población que respaldan muchos de los cálculos de los otros componentes, como FamPlan, Costo-Beneficio, AIM, y RAPID (Stover *et al.*, 2007).

DemProj. El modelo demográfico en Spectrum, conocido como DemProj, es un programa informático para hacer proyecciones de población para países o regiones. El programa requiere información del número de personas por edad y sexo en el año base, así como los datos del año base y los supuestos futuros acerca de la Tasa Global de Fecundidad (TGF), la distribución de la fecundidad por edad, la esperanza de vida al nacer por sexo, la tabla de vida más apropiada en el modelo, y la magnitud y patrón de la migración internacional⁴.

RAPID. Es un modelo de impacto socio-económico en Spectrum, es un programa computarizado para realizar proyecciones de indicadores sociales y económicos para países o regiones. El programa requiere información sobre los diferentes indicadores, tales como la tasa de participación de la fuerza laboral, la tasa de matrícula de primaria y el número de enfermeras per cápita, por señalar algunos. Esta información se combina con las proyecciones de población (creadas en el módulo DemProj de Spectrum) para hacer proyecciones sobre los requerimientos futuros de estos indicadores hasta para un máximo de 50 años (Abel, 2001).

⁴ *Ibíd*

Redatam+SP. El Centro Latinoamericano y Caribeño de Demografía (CELADE / CEPAL) desarrolla el software para procesar y mapear datos de censos y encuestas para análisis local y regional. El módulo Process está destinado al procesamiento estadístico y generación de indicadores sociodemográficos. Donde se puede realizar el proceso y análisis de información proveniente de censos de población y vivienda, genera indicadores en las áreas como: déficit en educación, estimación del déficit habitacional, caracterización de grupos específicos de población (tercera edad, jóvenes adolescentes, poblaciones indígenas) y sus características sociodemográficas, migración y estimación de NBI (CELADE, 2004).

STATA. Data Analysis and Statistical Software. Es un software estadístico de propósito general creado en 1985 por StataCorp. Es utilizado por muchas empresas e instituciones académicas en todo el mundo. La mayoría de sus usuarios trabajan investigación, especialmente en las áreas de economía, sociología, ciencias políticas y la epidemiología.

1.5. Herramientas desarrolladas para casos específicos

Gracias a los sistemas de información geográfica se han podido realizar infinidad de estudios de caso alrededor del mundo y de igual forma en nuestro país, entre los que se encuentran:

Goodrich *et al.* (2006) desarrollan el Sistema Automatizado de Evaluación de Cuencas Geoespacial (AGWA, véase: www.tucson.ars.ag.gov/agwa) es una herramienta SIG desarrollada conjuntamente por el USDA Agricultural Research Service, los EE.UU. Agencia de Protección Ambiental, la Universidad de Arizona y la Universidad de Wyoming a automatizar la parametrización y la ejecución de los modelos hidrológicos Soil Water Assessment Tool (SWAT) y KINEmatic Runoff and EROSIon (KINEROS2). Mediante el empleo de estos dos modelos AGWA

puede llevar a cabo las evaluaciones de modelos hidrológicos y de cuencas hidrográficas en cualquier momento y con múltiples escalas espaciales. AGWA utiliza comúnmente capas de datos nacionales disponibles, para parametrizar, ejecutar, y visualizar los resultados tanto de los SWAT y KINEROS2.

Jenness *et al.* (2007) desarrollan una herramienta de base de datos de los recursos hídricos africanos que es un diseño combinada con los sistemas de información geográfica (SIG) destinada a facilitar la gestión de los recursos acuáticos continentales y la agricultura con un enfoque en la pesca continental y la agricultura, bajo las recomendaciones de Committee for Inland Fisheries of Africa (CIFA).

Chávez (s.f.) desarrolla un modelo para determinar el riesgo de erosión de suelo en cuatro micro-cuencas de la Cordillera Los Maribios, Nicaragua. Esta zona se caracteriza por tener suelos de origen volcánico, topografía montañosa con pendientes profundas y clima tropical con dos estaciones bien diferenciadas, invierno y verano. Estas características hacen que los suelos de esta región sean susceptibles a erosión, especialmente durante el invierno. Esta investigación integra la Ecuación Universal de Erosión de Suelo (USLE) con un Sistema de Información Geográfico (SIG) para modelar el riesgo de erosión de suelo. El modelo resultante USLE-SIG proporciona una herramienta útil de planificación y conservación de suelos.

Rodríguez *et al.* (2004) desarrollan un sistema de información geográfica en la evaluación de la erosión hídrica en Badajoz-España aplicando la metodología USLE. Se evaluó la erosión hídrica de los suelos de un área de la Provincia de Badajoz-España, con la aplicación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE), que permite calcular los distintos niveles de pérdidas en Mg ha⁻¹ año⁻¹.

1.6. Desarrollo de herramientas y casos de estudio con SIG en México

A continuación se presentan algunos antecedentes en el uso o desarrollo de los SIG's:

Vargas et al. (2009) realizan un análisis morfométrico y descripción de cuencas en Tongoy, región de Coquimbo, haciendo uso de River tools.

Sistema de información hidrológica de cuencas transfronterizas México-Estados Unidos realizado por el Instituto Tecnológico de Zacatepec, el Instituto Tecnológico de Libres y el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Es un sistema hidrológico que fue desarrollado para apoyar la gestión del agua en las cuencas transfronterizas compartidas por México y Estados Unidos. El sistema se compone de una base de datos geográfica con la estructura de ArcHydro, la cual contiene datos espaciales y series de tiempo asociadas al recurso, ambos lados de la frontera, y herramientas para actualización y consulta de estos datos.

López (2005) incluye los resultados de tres casos de estudio para tener una idea clara de la potencialidad de realizar análisis geográfico con un SIG.

Caso de estudio 1: Evaluación de la erosión acelerada de los suelos con videoimágenes obtenidas desde el globo aerostático y procesadas con un SIG. Es un estudio de cambios con el fin de cuantificar el avance de los procesos erosivos en un sistema de cárcavas (rasgos del relieve resultado de la erosión acelerada de suelo). Se procesaron en un SIG imágenes obtenidas con una cámara de video para determinar las aéreas de suelo perdidas y las longitudes máximas de avance de los procesos erosivos durante lapsos considerados. La metodología se apoya fundamentalmente en el uso de teledetección videográfica dentro del SIG.

Caso de estudio 2: Evaluación de cambios de cobertura y uso de suelo en la cuenca del río Temascaltepec, Nevado de Toluca. Se obtuvo una evaluación de

las tendencias de cambios y de las características morfológicas y de distribución de los predios en uso agrícola y forestal del suelo, en la cuenca alta del río Temascaltepec (laderas oeste y suroeste del Nevado de Toluca). Se consideraron las variables: altitud, pendiente y superficie de los predios.

Caso de estudio 3: Regionalización ambiental y ordenamiento territorial en el municipio de Los Cabos, Baja California Sur. Se aplicó levantamiento geomorfológico, analítico y sintético con el fin de delimitar las unidades ambientales biofísicas o de regionalización ecológica, analizando la información dentro del contexto de un SIG.

Montes *et al.* (2001) Metodología para la estimación del riesgo de erosión hídrica en cuencas hidrográficas utilizando un SIG. Se presenta en este trabajo una metodología para evaluar el riesgo de erosión hídrica en la Cuenca Hidrográfica “Santa Catarina” en el Estado de Querétaro. El riesgo fue evaluado mediante el análisis multiplicativo de cuatro factores incluidos en la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS). Los cuatro factores considerados involucran la potencialidad erosiva de la lluvia y el escurrimiento (factor R), la susceptibilidad del suelo a la erosión (factor K) y el efecto del grado (factor S) y la longitud de la pendiente (factor L). Los resultados obtenidos muestran total concordancia al coincidir las regiones ya erosionadas actualmente con aquellas encontradas con un riesgo muy alto de erosión. Los resultados sirvieron también para la planeación de un programa de manejo y conservación del recurso suelo de la Cuenca.

Díaz *et al.* (2008). Determinación de los índices de erosión de suelos aplicando análisis SIG para la localización de San Andrés en la provincia de Pinar del Río.

Valtierra (2007) desarrolla una herramienta computacional para el diagnóstico hidrológico de cuencas, específicamente para obtener la

caracterización hídrica del PRPC (Plan Rector de Producción y Conservación), dicha herramienta (DetermHidro) funciona como una extensión de ArcView 3.x.

CIDE (2002) desarrolla ENNViH, ENCUESTA NACIONAL SOBRE NIVELES DE VIDA DE LOS HOGARES. Ganadora del *Premio Regional a la innovación Estadística* (Banco Mundial). Es una base de datos de naturaleza multitemática y de corte longitudinal que recoge en un solo instrumento información amplia sobre indicadores socioeconómicos, demográficos y de salud de la población mexicana.

La ENNViH es la primera encuesta en México con representatividad nacional que parte de un diseño longitudinal, lo que permite seguir a los mexicanos a lo largo del tiempo independientemente de sus decisiones de migración, con el objetivo de estudiar la dinámica económica, demográfica, epidemiológica y migratoria de la población a través de una encuesta panel de por lo menos 10 años de duración.

CAPÍTULO II. SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA Y ARCGIS

La construcción de modelos y programas informáticos de alta capacidad en el manejo de los datos pueden constituirse en un medio de socialización, tanto de la propia información generada, como de las herramientas adecuadas que faciliten la toma de decisiones en el momento propicio con los actores involucrados.

Indudablemente los sistemas de información geográfica permiten solucionar múltiples necesidades técnicas y al mismo tiempo, su uso ha impulsado una modificación estructural del accionar teórico y práctico en el planeamiento de estas soluciones.

2.1. Los SIG's como herramientas informáticas

Un Sistema de Información Geográfica (SIG o GIS, por sus siglas en inglés, Geographic Information System) es una integración organizada de *hardware*, *software* y datos geográficos diseñada para capturar, almacenar, manipular, analizar y desplegar en todas sus formas la información geográficamente referenciada con el fin de resolver problemas complejos de planificación y gestión. También puede definirse como un modelo de una parte de la realidad referido a un sistema de coordenadas terrestre y construido para satisfacer unas necesidades concretas de información. En el sentido más estricto, es cualquier sistema de información capaz de integrar, almacenar, editar, analizar, compartir y mostrar la información geográficamente referenciada. En un sentido más genérico, los SIG son herramientas que permiten a los usuarios crear consultas interactivas, analizar la información espacial, editar datos, mapas y presentar los resultados de todas estas operaciones.

La función principal de los SIG es contar con cartografía y una base de datos asociada con el objetivo principal de resolver problemas espaciales, es decir, un programa que permita manejar conjuntamente la cartografía y las bases de datos alfanuméricas asociadas.

Por lo anterior, se podría pensar en un diseño asistido por computadora, mejor conocido por sus siglas en inglés CAD (Computer Aided Design) que son un amplio rango de programas computacionales de dibujo en dos dimensiones (2D) y modeladores en tres dimensiones (3D) que asisten a ingenieros, arquitectos, y en general a profesionales del diseño en sus respectivas actividades, tales como *Autocad* o *Microstation*, que permiten asociar bases de datos a los elementos del dibujo. Pero la diferencia fundamental es que con un SIG es posible realizar análisis de la cartografía para generar nueva cartografía en función de los resultados obtenidos, además de hacer consultas más completas al poder combinar criterios alfanuméricos y espaciales.

Existen definiciones más académicas que hacen hincapié en el SIG como disciplina o ciencia aplicada, incluyen en su formulación no solo al software sino también el hardware, equipo técnico y filosofía de trabajo integrando todo de una forma global. Una de las más citadas es la del *National Center for Geographic Information and Analysis (NCGIA, 1990)*:

"un sistema de hardware, software y procedimientos diseñados para facilitar la obtención, gestión, manipulación, análisis, modelación y salida de datos espacialmente referenciados, para resolver problemas complejos de planificación y gestión".

La definición del diccionario de la *Association for Geographic Information (AGI)* y el Departamento de Geografía de la Universidad de Edimburgo lo explica como:

"un sistema de cómputo para obtener, almacenar, integrar, manipular, analizar y representar datos relativos a la superficie terrestre".

2.1.1. Componentes de un SIG

Los SIG como los demás sistemas de información trabajan de manera integrada, en este sentido, existen cinco componentes principales, donde Parra *et al.* (1997) los definen como:

2.1.1.1. Hardware

El hardware es la parte tangible de la computadora que sirve de soporte al SIG; para este tipo de sistemas se requiere de equipos con alta velocidad de procesamiento y gran capacidad de almacenamiento de datos digitales, las características del equipo dependen de los requerimientos del usuario.

Como parte del hardware, se encuentran dispositivos periféricos adicionales a la computadora, como son los GPS, plotters, tableta digitalizadora, etcétera.

2.1.1.2. Software

El software es el conjunto de componentes lógicos, necesarios para llevar a cabo las tareas específicas. Los programas SIG proveen las herramientas y funcionalidades necesarias para almacenar, analizar y mostrar información geográfica, los componentes principales del software SIG son:

- Sistema de manejo de base de datos.
- Una interface gráfica de usuarios (IGU) para el fácil acceso a las herramientas.
- Herramientas para captura y manejo de información geográfica.
- Herramientas para soporte de consultas, análisis y visualización de datos geográficos.

Actualmente la mayoría de los proveedores de software SIG distribuyen productos fáciles de usar y pueden reconocer información geográfica estructurada en muchos formatos distintos.

2.1.1.3. Información

El componente más importante para un SIG es la información. Se requiere de adecuados datos de soporte para que el SIG pueda resolver los problemas y contestar a preguntas de la forma más acertada posible. La obtención de datos correctos, generalmente absorbe entre un 60 y 80% del presupuesto de implementación del SIG, y la recolección de los datos es un proceso largo que frecuentemente demora el desarrollo de productos que son de utilidad. Los datos geográficos y alfanuméricos pueden obtenerse por recursos propios u obtenerse a través de proveedores de datos. Mantener, organizar y manejar los datos debe ser política de la organización.

2.1.1.4. Personal

Las tecnologías SIG son de valor limitado si no se cuenta con los especialistas en manejar el sistema y desarrollar planes de implementación del mismo. Sin el personal experto en su desarrollo, la información se desactualiza y se maneja erróneamente, el hardware y el software no se manipula en todo su potencial.

2.1.1.5. Procedimientos o Métodos

Para que un SIG tenga una implementación exitosa debe basarse en un buen diseño y reglas de actividad definidas, que son los modelos y prácticas operativas exclusivas en cada organización.

2.1.2. Funciones de los SIG

Los programas SIG tienen una serie de funciones diseñadas para la gestión de información geográfica:

Captura, registro y almacenamiento de datos: el paso de información analógica, en papel, a formato digital de una computadora; esto se puede realizar de varias maneras como digitalización, vectorización, importación y otras.

- *Estructuración de datos y manipulación:* creación de bases de datos, de nueva cartografía.
- *Proceso, análisis y gestión de datos:* topología, consultas gráficas, alfanuméricas, combinadas, superposición de planos e información.
- *Creación de salidas:* impresión de informes, graficación de planos y publicación en diversos formatos electrónicos.

Un SIG usualmente responde a las siguientes cuestiones:

- Localización *¿Qué hay en...?*
- Condición *¿Dónde sucede que...?*
- Tendencias *¿Qué ha cambiado...?*
- Rutas *¿Cuál es el camino óptimo...?*
- Pautas *¿Qué pautas existen...?*
- Modelos *¿Qué ocurriría si...?*

Estas cuestiones son de interés primordial en actividades relacionadas con la planificación. Para instituciones de investigación, los SIG contribuyen al estudio de la distribución y monitoreo de recursos, tanto naturales como humanos, tecnológicos, de infraestructura y sociales así como en la evaluación del impacto de las actividades humanas sobre el medio ambiente respectivo. De esta forma se contribuye; por ejemplo, en la planeación de actividades destinadas a la preservación de los recursos naturales.

Toda la generación de nueva información que puede proveer un SIG depende significativamente de la información que posee la base de datos disponible. La calidad de esta base de datos y sus contenidos determinan la cantidad y calidad de los resultados obtenidos del SIG.

2.1.3. Funcionamiento de los SIG

La construcción y sobre todo la implementación de un SIG en cualquier organización es una tarea siempre progresiva, compleja, laboriosa y continua. Los análisis y estudios previos a la implantación de un SIG son semejantes a los que se deben realizar para establecer cualquier otro sistema de información; sin embargo, en los SIG hay que considerar las características especiales de los datos utilizados y sus correspondientes procesos de actualización.

Los datos son el principal recurso de los sistemas de información, por tanto, la eficiencia y funcionalidad de un SIG se miden por el tipo, la calidad y vigencia de los datos con los que opera.

Tanto las bases de datos como la disponibilidad de un SIG eficiente y funcional, requieren de grandes inversiones y esfuerzos, que además debe ser permanente por ampliar y mejorar los datos almacenados, utilizando las herramientas cada vez más eficientes para tal propósito.

Toda información geográfica contiene una referencia territorial explícita como latitud y longitud o una referencia implícita como la calle o código postal. Las referencias implícitas pueden ser derivadas de referencias explícitas mediante geocodificación (ESRI, 1996).

Los SIG funcionan con dos tipos diferentes de información geográfica: vectorial y raster.

2.1.3.1. Información vectorial

La información se representa mediante puntos, líneas y polígonos, se almacena como una colección de coordenadas x, y. La ubicación de una característica puntual, pueden describirse con un sólo punto x, y. Las características lineales, pueden almacenarse como un conjunto de puntos de coordenadas x, y. Las características poligonales, pueden almacenarse como un circuito cerrado de coordenadas.

2.1.3.2. Información raster

La información raster funciona a través de una retícula que permite asociar datos a una imagen; es decir, se pueden relacionar paquetes de información a los píxeles de una imagen digitalizada, conocido como grid.

2.1.4. Alcances de los sistemas de información geográfica

Como se ha visto, los SIG constituyen una herramienta muy poderosa para la gestión de información y su relación con algo tan tangible como un predio, un río o una obra de desarrollo urbano. Sin embargo, es muy importante conocer los alcances de un sistema como este para aprovechar sus potencialidades al máximo, utilizándolo como una referencia más en el delicado proceso de toma de decisiones de la empresa, el gobierno y las asociaciones civiles.

De esta manera se pueden identificar algunas de las habilidades de los SIG como herramienta en los procedimientos de gestión. Un SIG permite entonces:

- Realizar un gran número de manipulaciones, sobresaliendo las superposiciones de mapas, transformaciones de escala, la representación gráfica y la gestión de bases de datos.

- Consultar rápidamente las bases de datos, tanto espacial como alfanumérica, almacenadas en el sistema.
- Realizar pruebas analíticas rápidas y repetir modelos conceptuales en despliegue espacial.
- Comparar eficazmente los datos espaciales a través del tiempo (análisis temporal).
- Efectuar algunos análisis, de forma rápida que hechos manualmente resultarían largos y molestos.
- Integrar en el futuro, otro tipo de información complementaria que se considere relevante y que esté relacionada con la base de datos nativa u original.

2.1.5. Tecnologías relacionadas con los SIG

Los sistemas de Información Geográfica comparten características con otros sistemas de información, pero su habilidad de manipular y analizar datos geográficos los distingue del resto. La siguiente sería una forma de clasificar los sistemas de información con los que se relaciona los SIG:

- Mapeo de escritorio
- Herramientas CAD
- Sensores remotos
- Sistemas Manejadores de Bases de Datos

2.1.6. Aplicaciones de los sistemas de información geográfica

En la mayoría de los sectores los SIG pueden ser utilizados como una herramienta de ayuda a la gestión y toma de decisiones, a continuación se listan algunas de sus aplicaciones principales:

- Cartografía automatizada
- Infraestructura
- Gestión territorial
- Medio ambiente
- Equipamiento social
- Recursos mineros
- Ingeniería de Tránsito
- Demografía
- GeoMarketing
- Banca
- Planimetría
- Cartografía Digital 3D

2.2. ArcGIS

ArcGIS (www.arcgis.com) es un completo sistema de información que permite crear, analizar, almacenar y difundir datos, modelos, mapas y globos en 3D, poniéndolos a disposición de todos los usuarios según las necesidades de la organización. Como sistema de información, ArcGIS es accesible principalmente desde clientes de escritorio, navegadores web y terminales móviles que se conectan a servidores departamentales, corporativos o arquitecturas de computación en la nube (Cloud Computing ⁵). Para los desarrolladores, proporciona herramientas que les permiten crear sus propias aplicaciones.

La información dentro de ArcGIS es trabajada de manera sistémica, lo que representa una diferencia sustancial a lo relacionado al trabajo con información planos y mapas, permitiendo explorar, ver y analizar los datos según parámetros,

⁵ Cloud Computing es un paradigma que permite ofrecer servicios de computación a través de Internet.

relaciones y tendencias que presenta la información, teniendo como resultado nuevas capas de información, mapas y nuevas bases de datos.

El ámbito de acción de ArcGIS va desde el apoyo en la planificación de un negocio en particular, hasta el análisis espacial de enfermedades de una ciudad. Su arquitectura está elaborada de tal manera que sus herramientas entregan sistemas inteligentes de información geográfica, permitiendo la construcción de un SIG completo basado en un conjunto de librerías comunes de los componentes compartidos del software SIG llamados ArcObjects.

En general, ArcGIS es un conjunto de productos de software de SIG producido y comercializado por Environmental Systems Research Institute (ESRI, 2010), bajo este nombre genérico se agrupa un conjunto de aplicaciones (Figura 1), para la captura, edición, análisis, tratamiento, diseño, publicación e impresión de información geográfica.

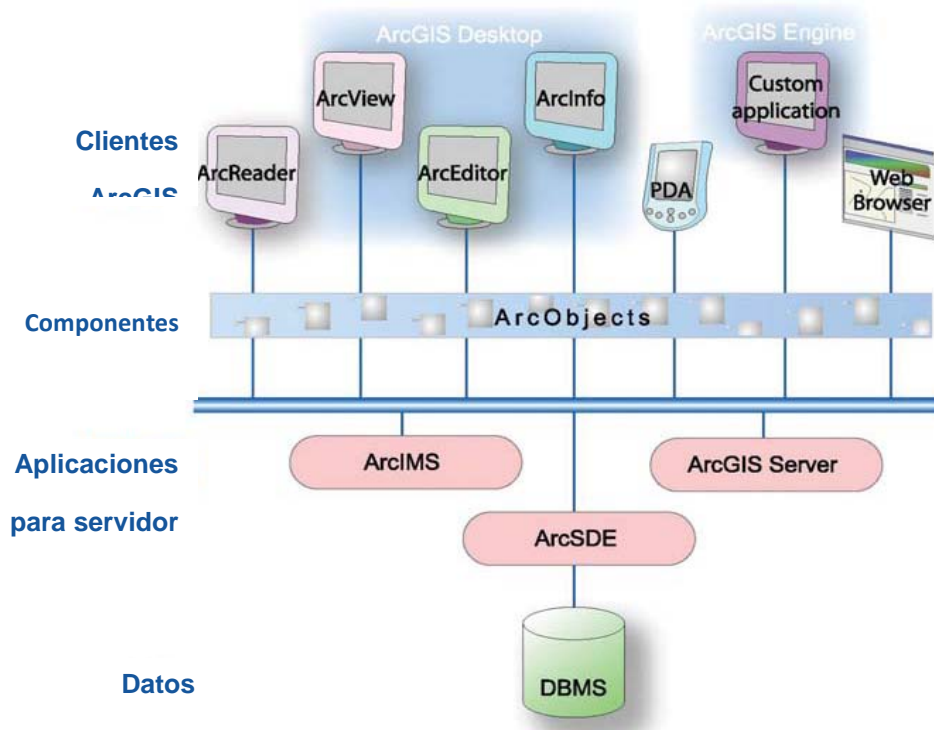


Figura 1. ArcGIS.
Fuente: ESRI, 2010

Estas aplicaciones agrupan en familias temáticas, las cuales se describen en los apartados siguientes: como:

2.2.1. ArcGIS Desktop

La familia de aplicaciones SIG de escritorio, es una de las más ampliamente utilizadas, incluyendo en sus últimas ediciones las herramientas ArcReader, ArcMap, ArcCatalog, ArcToolbox, ArcScene y ArcGlobe, además de diversas extensiones. ArcGIS Desktop se distribuye comercialmente bajo tres niveles de licencias que son, en orden creciente de funcionalidades (y costo): ArcView, ArcEditor y ArcInfo.

2.2.2. ArcGIS Engine

ArcGIS Engine es una colección de componentes SIG y recursos para desarrolladores que pueden ser integrados, lo que le permite agregar un mapeo dinámico y las capacidades de las aplicaciones SIG existentes o construir nuevas aplicaciones de mapas personalizados.

Es una plataforma para la creación personalizada de aplicaciones SIG independientes que soporta múltiples interfaces de programación de aplicaciones (API's) como son COM, .NET, JAVA y C++, incluyen la funcionalidad SIG avanzado independiente y son construidas usando parámetros estándares.

Estas herramientas, además de proporcionar API's, software y recursos para crear innovadoras soluciones de SIG para escritorio, dispositivos móviles, servidores y web, proporcionan múltiples escenarios que se usan para ilustrar con ejemplos de código para distintos tipos de aplicaciones que pueden ser desarrolladas en ArcGIS Engine.

2.2.3. ArcGIS Server

Es un software para la publicación y gestión web; distribuir mapas, modelos y herramientas para otros en una organización de manera que encaja en los flujos de trabajo. ArcGIS Server da la capacidad de crear, administrar y distribuir los servicios SIG en la red para soportar aplicaciones de mapeo de escritorio, móviles y web.

ArcGIS Server simplifica el acceso a los servicios SIG para expertos en la materia, los trabajadores móviles, así como trabajadores sin ningún tipo de experiencia. Así mismo, permite tener el control de su contenido a través de la gestión centralizada de los datos espaciales, incluyendo imágenes.

Además, ArcGIS Server proporciona una plataforma de servidor escalable que los SIG se pueden desplegar en una sola máquina para apoyar a pequeños grupos de trabajo, o se puede distribuir entre varios servidores para soportar aplicaciones empresariales. También puede implementar la infraestructura de Cloud Computing.

2.2.4. ArcGIS Online

Proporciona una plataforma común para buscar, compartir y organizar contenido geográfico, además de la creación de aplicaciones SIG. A través de ArcGIS.com, la interfaz web para ArcGIS Online, se puede acceder a mapas, aplicaciones, herramientas e información publicada por ESRI y otros usuarios, y compartir contenidos con una amplia comunidad de usuarios.

Con ArcGIS Online se puede:

- El libre acceso, de alta calidad y listo para usar mapas base
- Crear y unirse a grupos

- Desarrollar aplicaciones web de forma rápida
- Ahorrar tiempo y dinero

2.2.5. ArcGIS Mobile

Es un software para la captura y gestión de información de campo; es decir el personal de campo puede capturar, actualizar y analizar la información geográfica para la toma rápida de decisiones.

ArcGIS Mobile ayuda a las organizaciones a ofrecer las capacidades de los SIG y los datos de servidores centralizados a una gama de dispositivos móviles. Es posible utilizar ArcGIS Mobile para desplegar aplicaciones móviles intuitivas y productivas para aumentar la precisión y mejorar la actualización de los datos SIG en toda la organización.

Aplicaciones fáciles de usar para el personal de campo que no necesariamente cuentan con experiencia para hacer mapeo, consultas espaciales, dibujar, integraciones GPS y ediciones SIG.

2.2.6. ArcGIS Free

ArcGIS proporciona software libre para visualizar y compartir información espacial, entre los que se encuentran:

- Desktop: ArcGIS Explorer Desktop y ArcReader
- Web: ArcGIS Explorer Online y ArcGIS.com Map Viewer
- Mobile: ArcGIS for Smartphones

El sistema ArcGIS proporciona una infraestructura para que los mapas y la información geográfica estén disponibles en toda una organización, en una comunidad y abiertamente en internet, pero no es hasta que se desea personalizar

ArcGIS Desktop o construir aplicaciones propias, que se familiariza con ArcObjects, ya sea mediante macros en Visual Basic Application (incluido en ArcGIS Desktop) o por ArcGIS Engine o ArcGIS Server.

2.2.7. ArcObjects

Es un conjunto de componentes de software desarrollados mediante tecnología COM de Microsoft, con la que se han construido productos como ArcGIS Desktop, ArcGIS Engine y ArcGIS Server. Por lo tanto, para programar con alguno de estos paquetes de software, es necesario usar la librería ArcObjects.

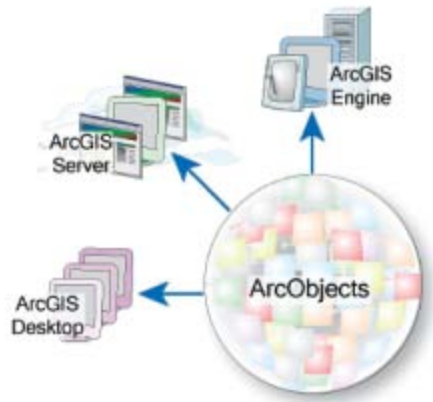


Figura 2. El sistema ArcGIS.
Fuente: ESRI, 2010

Existen diversas posibilidades que dan mucha flexibilidad para el desarrollo de aplicaciones, entre las que se encuentran:

1. Visual Basic Application (VBA). Incluido en ArcGIS Desktop (ArcMap, ArcCatalog, ArcSene), es, quizá, la forma más rápida y sencilla de iniciarse, ya que es fácil de probar y muy flexible, sin embargo no es POO (Programación Orientada a Objetos), es difícil reutilizar código. Es necesario estar dentro de las aplicaciones de ArcGIS Desktop.

2. Python como lenguaje de script. Con python se accede al objeto de alto nivel Geoprocessor, lo que nos permite utilizar en scripts o macros cualquiera de las herramientas con las que cuenta ArcToolBox o en Model Builder. Disponible en ArcGIS Desktop. Es fácil de aprender, muy útil para crear procesos batch, aunque no es adecuado para crear grandes programas, falta de integración con interfaces gráficas.
3. Lenguaje compatible COM. Hay dos vías actualmente, en primer lugar compilar a código nativo con un lenguaje como puede ser C++ o Visual Basic, o utilizar la plataforma .NET de Microsoft (cualquier lenguaje) para crear ensamblados interoperables con la librería COM ArcObjects. Disponible en ArcGIS Desktop, ArcGIS Engine y ArcGIS Server para plataformas Windows. Tiene muy amplias posibilidades de desarrollo, incluyendo la capacidad de construir un SIG completo, con necesidades a medida, en cualquier entorno, el código es de alta reutilización. Existe la desventaja que solo es para plataformas sólo para plataformas Windows.
4. Java, a través de la interoperabilidad con objetos COM que proporciona JIntegra (<http://j-integra.intrinsyc.com/>). Es multiplataforma (Windows, Linux, Solaris), integración muy buena con infraestructuras empresariales de todo tipo y alta reutilización del código, sin embargo tiene una ligera pérdida de rendimiento (puede ser importante en algunas aplicaciones), más difícil de programar.
5. C++ multiplataforma. Disponible en ArcGIS Engine, da la posibilidad de crear aplicaciones multiplataforma con código nativo.

Para efectos del presente trabajo, se desarrollaron las herramientas relacionadas a cuencas hidrográficas mediante ArcGIS Engine haciendo uso de un lenguaje COM para ArcGIS Desktop, específicamente para ArcMap.

CAPÍTULO III. MARCO TEÓRICO PARA EL DESARROLLO DE HERRAMIENTAS PARA ARCGIS

La morfología se ocupa del estudio de las formas superficiales, en este sentido estudia y pretende cuantificar determinados rasgos propios de la superficie terrestre (Campos Aranda, 1998).

En todos o casi todos los estudios de cuencas es indispensable realizar un diagnóstico de las características físicas y socioeconómicas de la unidad de estudio, y para esto es de suma importancia entender los conceptos básicos relacionados a las cuencas hidrográficas.

3.1. Definición de cuenca hidrográfica

La cuenca hidrográfica es considerada la unidad básica de estudio y se define como una zona de la superficie terrestre tal que, si fuera impermeable todas las gotas de lluvia que caen sobre ella, tienden a ser drenadas por un sistema de corrientes hacia un mismo punto de salida. Específicamente, una cuenca es el área de la superficie terrestre por donde el agua de lluvia escurre y transita a través de una red de drenaje que fluye hacia una corriente principal y por ésta hacia un punto común de salida que puede ser un almacenamiento de agua interior, como un lago, una laguna o el embalse de una presa o puede llegar hacia el mar (Domínguez, 2006).

Además de la definición antes citada, Domínguez (2009) también define las cuencas hidrográficas como unidades morfográficas superficiales, sus límites quedan establecidos también por la divisoria geográfica principal de las aguas de las precipitaciones, también conocido como "parteaguas". El parteaguas, teóricamente, es una línea imaginaria que une los puntos de máximo valor de altura relativa entre dos laderas adyacentes pero de exposición opuesta, desde la

parte más alta de la cuenca hasta su punto de emisión, en la zona hipsométricamente más baja. Al interior de las cuencas se pueden delimitar cuencas o subcuencas de orden inferior. Las divisorias que delimitan las subcuencas se conocen como parteaguas secundarios.

Faustino *et al* (2006) comentan que las cuencas son espacios socio geográficos donde las personas y sus organizaciones comparten el territorio, sus identidades, tradiciones y culturas, socializan y trabajan en función de la disponibilidad de recursos. Las cuencas hidrográficas se reconocen como un sistema debido a la existencia de interacciones entre el sistema natural del suelo, el agua y biodiversidad y el sistema socioeconómico, que si bien éste no tiene un límite físico, sí depende de la oferta, calidad y disposición de los recursos. Los diferentes componentes del sistema cuenca no siempre se encuentran dispuestos de manera coordinada; por ejemplo, la división político-administrativa de un país puede no coincidir con las divisiones de las cuencas hidrográficas, por lo tanto, se tiene en la cuenca, ingerencia de varios municipios/provincias/departamentos u organizaciones estatales, todo en función a la dimensión de cada territorio.

De igual forma, a la cuenca hidrográfica se les reconoce como un área de terreno que está formada por un sistema de drenaje, es decir, un río principal y sus afluentes secundarios, terciarios o de cuarto orden. El sistema de drenaje muestra el comportamiento y manejo de los recursos de la cuenca, como son el agua, el suelo y la vegetación, además de cómo las actividades o infraestructura afectan el funcionamiento de la misma.

Cada vez más países han considerado que las grandes y pequeñas cuencas hidrográficas son los territorios más adecuados para llevar a cabo procesos de manejo, aprovechamiento, planeación y administración del agua, es decir, que son los espacios ideales para la gestión integrada del recurso agua, así como de toda la cuenca.

Las cuencas además de ser los territorios donde se verifica el ciclo hidrológico, son espacios geográficos donde los grupos y comunidades comparten identidades, tradiciones y cultura, y en donde socializan y trabajan los seres humanos en función de su disponibilidad de recursos renovables y no renovables. En las cuencas, la naturaleza obliga a reconocer necesidades, problemas, situaciones y riesgos hídricos comunes, por lo que debería ser más fácil coincidir en el establecimiento de prioridades, objetivos y metas comunes, y en la práctica de principios básicos que permiten la supervivencia de la especie, como el de corresponsabilidad y el de solidaridad en el cuidado y preservación de los recursos naturales. Es por ello que resulta conveniente conocer y comprender las características principales de las cuencas y los procesos hidrológicos que en ella se desarrollan (Domínguez, 2009).

3.2. Tipos de cuencas

Existen fundamentalmente dos tipos de cuencas: endorreicas y exorreicas, sin embargo encontramos otros tipos considerando la salida, y son:

- *Cuenca Endorreica*: Cuencas que desembocan en lagos, lagunas o salares, no tienen comunicación ni salida fluvial al mar, es decir, el punto de salida de los escurrimientos se encuentra dentro de los límites de la propia cuenca.
- *Cuenca Exorreica*: En este tipo de cuenca, el punto de salida se encuentra en los límites de la misma y drena sus aguas a otra corriente o al mar u océano.
- *Cuenca Arreica*: Las aguas de estas cuencas se evaporan o se filtran en el terreno antes de formar parte de una red de drenaje, ya que no existe una permanente.

- *Cuenca Criptorreica*: Este tipo de cuenca se da cuando los escurrimientos se filtran y se convierten en ríos subterráneos.

3.3. Clasificación de una cuenca

Las cuencas se pueden clasificar tomando en cuenta la superficie de la misma, en este sentido Campos Aranda (1998) las clasifica de acuerdo a la siguiente tabla:

Tamaño de la cuenca (Km ²)	Descripción
< 25	Muy pequeña
25 a 250	Pequeña
250 a 500	Intermedia – Pequeña
500 a 2500	Intermedia – Grande
2500 a 50000	Grande
>50000	Muy grande

Tabla 1. Clasificación de las cuencas de acuerdo a la superficie

Otros autores toman la misma clasificación de las cuencas, pero en este caso Domínguez (2009) llama a la clasificación “muy pequeña” como “microcuencas”.

Es importante mencionar que en ocasiones es difícil delimitar o definir el tamaño de una cuenca debido a que el terreno es muy plano, es decir, las pendientes del mismo son muy pequeñas.

Jerárquicamente hablando, el manejo de las cuencas suele ser un proyecto que se maneja de igual manera, pero de acuerdo a su jerarquía (microcuenca,

subcuenca, cuenca o macrocuenca), se pueden crear políticas para cuencas mayores y políticas más específicas para cuencas pequeñas. Además de que en numerosos casos, los límites de las cuencas no coinciden con los límites políticos, lo cual es un conflicto, ya que existen muchos intereses de por medio que dificultan el manejo de la cuenca como unidad de estudio.

Además de la clasificación de las cuencas por tamaño, existe otro tipo de clasificación que se hace de acuerdo a la ejecución de las políticas públicas y la planeación hidráulica (FIRCO, 2005), y se describen como sigue:

- *Regiones Hidrológicas o macrocuencas*: Corresponden a los enormes sistemas hidrológicos, se utiliza para dividir el país en grandes regiones, definidas por su red hidrográfica y representarlas a escalas pequeñas como 1:1'000, 000 y 1:500,000.
- *Cuenca*: Se considera como parte integrante de una región hidrológica, donde los escurrimientos son drenados por una red de drenaje principal, estas cuencas suelen ser de orden mayor a dos, su representación se da en escalas de 1:500,000 y 1:250,000.
- *Subcuenca*: Son parte de una cuenca y sus escurrimientos drenan a través de un sistema de corrientes secundarias hacia una corriente principal, su representación se da en escalas de 1:250,000 y 1:100,000.
- *Subcuenca tributaria*: Forman parte de una subcuenca y cuentan con un sistema de drenaje formado por uno o varios tributarios, la escala para su representación va de 1:100,000 y 1:50,000.
- *Subcuenca específica*: Pertenece a una subcuenca tributaria y de acuerdo a con FIRCO (2006) estas cuencas tienen una superficie entre

10,000 y 60,000 ha, la escala para su representación es de 1:50,000 y 1:10,000.

- *Microcuencas*: Es parte de una subcuenca específica y es considerada la unidad básica para el estudio integral de cuencas, la superficie es menor a 6,000 ha y se trabaja a escalas de 1:20,000 y 1:10,000.

Asimismo dentro de estas clasificaciones se encuentran las cuencas de dominio urbano, donde los arroyos y ríos son sustituidos por un sistema de alcantarillado y saneamiento. Dichas cuencas, a diferencia de las rurales, pueden ser afectadas por los patrones de consumo de agua de los habitantes de la zona (Rabuñal, 2010).

Además, en la actualidad existen 263 ríos que cruzan una o más fronteras, estos ríos forman cuencas binacionales o multinacionales, también llamados cuencas fronterizas.

Geográficamente se localizan 40 cuencas fronterizas en América del Norte, 38 en América del Sur, 69 en Europa, 59 en África y 57 en Asia. El total las cuencas internacionales ocupan un 45.3% de la superficie terrestre del planeta y afectan aproximadamente a un 40% de la población del mundo (Wolf *et al.*, 2003)

3.4. Características morfológicas de la cuenca

Aparicio (1999) menciona que el ciclo hidrológico, visto a nivel de una cuenca, se puede esquematizar como un estímulo, construido por la precipitación, al que la cuenca responde mediante el escurrimiento en su salida. Entre el estímulo y la respuesta ocurren varios fenómenos que condicionan la relación entre uno y otro, y que están controlados por las características morfológicas de la cuenca y su urbanización. Las características antes mencionadas se clasifican en

dos tipo, según la manera en que controlan los fenómenos mencionados: las que condicionan el *volumen de escurrimiento*, como el área de la cuenca y el tipo de suelo, y las que condicionan la *velocidad de respuesta*, como son el orden de corriente, pendientes de la cuenca y los cauces, etcétera.

Para efectos de este estudio solo se describirán las características de acuerdo a los requerimientos de los estudios en los apartados siguientes:

3.4.1. Área de la cuenca (A)

También llamada magnitud de cuenca, es el área plana en proyección horizontal incluida dentro del parteaguas o línea divisoria de la cuenca, (Campos Aranda, 1998). El área se expresa en kilómetros cuadrados, a excepción de las cuencas pequeñas, las cuales se expresan en hectáreas.

Se puede calcular con la ayuda de un SIG o de un planímetro, además de que existen otros métodos aproximativos entre los que se incluyen el método del papel cuadriculado.

El tamaño relativo de estos espacios hidrológicos definen o determinan, aunque no de manera rígida, los nombres de microcuenca, subcuenca o cuenca.

3.4.2. Perímetro de la cuenca (P)

El perímetro de la cuenca es la longitud del parteaguas en proyección horizontal, es decir, el contorno de la superficie de la cuenca, se expresa en unidades de metros.

Entiéndase por parteaguas de la cuenca a la línea imaginaria que une los puntos de mayor altitud entre dos ríos, y que divide el flujo de las aguas en direcciones opuestas, hacia uno u otro lado (Gutiérrez *et al.*, 1986).

3.4.3. Coeficiente de Compacidad o índice de Gravelius (K_c)

Monsalve (1999) citado por Domínguez (2009) menciona que el coeficiente de compacidad es el cociente entre el perímetro de la cuenca y la longitud de una circunferencia con un área igual a la de la cuenca y se representa mediante la siguiente fórmula:

$$K_c = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} = \frac{0.28P}{\sqrt{A}}$$

Fórmula 1. Coeficiente de compacidad.

donde:

P : es el perímetro de la cuenca en (Km)

A : es el área de la cuenca (Km^2)

Lo anterior significa que entre más circular sea la forma de la cuenca el coeficiente de compacidad será cercano a un valor de 1 y la respuesta hidrológica será más rápida.

3.4.4. Longitud de cuenca (L)

La longitud de la cuenca es también llamada longitud axial y se define la distancia de una línea recta en proyección horizontal que va desde la salida de la cuenca hasta el parteaguas en su punto más alejado, esta línea es paralela al cauce principal.

3.4.5. Longitud de cauce (L_c)

Es la longitud del cauce más largo dentro de la cuenca, es decir, el cauce principal; se expresa en unidades de metros.

3.4.6. Factor de forma (Kf)

El factor de forma tiene relación con la respuesta hidrológica de la cuenca debido a la forma de la misma. Dicho factor se define como la relación entre el ancho medio (B) y la longitud de cuenca (L). El ancho medio se obtiene al dividir el área (Km²) por la longitud de cuenca (Km).

$$Kf = \frac{B}{L} = \frac{\frac{A}{L}}{L} = \frac{A}{L^2}$$

Fórmula 2. Factor de forma.

donde,

L: es la longitud de la cuenca (Km).

A: es el área de la cuenca (Km²).

3.4.7. Orden de corriente de una cuenca

Campos Aranda (1998) dice que el orden de corriente es una clasificación que muestra el grado de ramificación o bifurcación de las corrientes dentro de una cuenca y se especifica de la siguiente forma:

- *Corrientes de primer orden*: son aquellas que no están ramificadas.
- *Corrientes de segundo orden*: solo tienen ramificaciones o corriente tributarias de primer orden.
- *Corrientes de tercer orden*: aquellas con dos o más corrientes tributarias de segundo orden o menores.
- *Corrientes de n orden*: las corrientes con dos o más corrientes tributarias de n-1 orden o menores.

Finalmente el orden de corriente de la cuenca tendrá el orden más alto de todas las corrientes que componen la red de drenaje. Domínguez (2009) dice que mientras más alto sea el orden de corriente, la cuenca drenará más eficientemente que una de orden menor.

3.4.8. Densidad de drenaje (Dd)

Se define como el resultado de dividir la sumatoria de las longitudes de las corrientes de la cuenca ($\sum l$) entre el área (A) de la misma.

$$Dd = \frac{\sum l}{A}$$

Fórmula 3. Densidad de drenaje.

donde:

$\sum l$: es la sumatoria de las longitudes de las corrientes de la cuenca (Km)

A: es el área de la cuenca (Km²)

La densidad de drenaje está relacionada con la geología, la topografía, las condiciones climatológicas y las actividades antropogénicas. Los valores mayores corresponden a cuencas con rocas blandas de baja permeabilidad y en regiones con escasa cobertura vegetal, sobre todo allí donde la precipitación se distribuye en aguaceros intensos y espaciados, también aumenta su valor cuando las corrientes tienen un alto grado de ramificación.

3.4.9. Densidad hidrográfica o de corriente (Dh)

La densidad hidrográfica o de corriente se refiere al número de corrientes por superficie de la cuenca, y se expresa en km² de la siguiente manera:

$$Dh = \frac{\sum Ni}{A}$$

Fórmula 4. Densidad hidrográfica o de corriente.

donde:

$\sum Ni$: es el número de corrientes de agua

A: es el área cuenca (km²)

Tanto la densidad de drenaje (Dd) como la densidad hidrográfica (Dh) se relacionan mediante la fórmula:

$$Dh = a \cdot Dd$$

Fórmula 5. Relación Dh y Dd.

donde:

a : es un coeficiente de ajuste.

3.4.10. Elevación máxima

La elevación máxima de una cuenca se refiere a la cota más alta de la cuenca, la cual forma parte del parteaguas de la misma.

3.4.11. Elevación media

La elevación media de una cuenca es el promedio de los valores de las cotas de la misma, el cual puede representarse de forma gráfica mediante un SIG y un modelo digital de elevación. Este parámetro es representativo en zonas montañosas.

3.4.12. Elevación mínima

La elevación mínima es el valor de la cota con la altitud más baja en la cuenca, suele ser el valor donde se encuentra el punto de salida de la cuenca.

3.4.13. Pendiente media

La pendiente media representa el promedio de las pendientes de la cuenca y está relacionado con la velocidad de los escurrimientos, el arrastre de sedimentos y el potencial de erosión de la cuenca.

3.4.14. Curva Hipsométrica

La curva hipsométrica está relacionada directamente con las elevaciones, proporciona información sintetizada sobre la altitud de la cuenca, y se refiere a una representación gráfica de la distribución de la cuenca vertiente por tramos de altura. Dicha gráfica presenta en las ordenadas (eje y), las distintas cotas de altura de la cuenca, y en las abscisas (eje x), el porcentaje acumulado de la superficie de la cuenca.

Gracias a la curva hipsométrica se puede determinar la fase en la que se encuentra una cuenca dada, como se observa en la Figura 3 se tiene:

- *Fase de juventud (curva A):* refleja una cuenca con un gran potencial erosivo.
- *Fase de madurez (curva B):* representa una cuenca en equilibrio.
- *Fase de vejez (curva C):* es representativa de una cuenca sedimentaria.

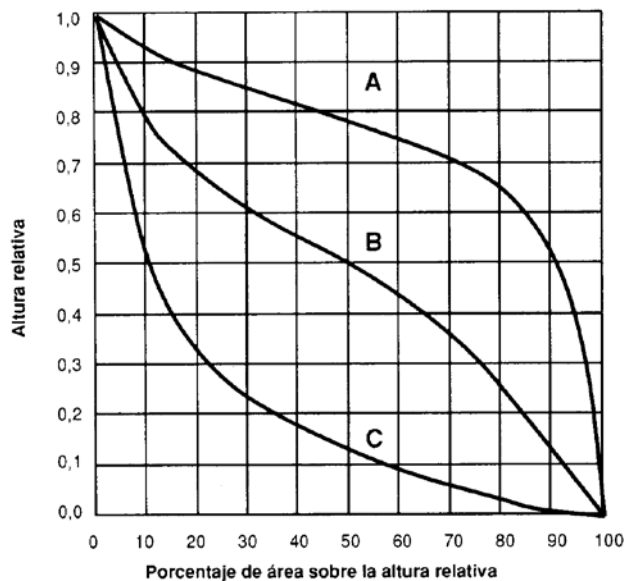


Figura 3. Fases de una cuenca representadas por la curva hipsométrica
Fuente: Domínguez, 2009

3.5. Estimación del grado de erosión hídrica de una cuenca

Existen procesos naturales y antropogénicos que afectan el funcionamiento de una cuenca, así como la productividad de las tierras de la misma.

Uno de estos procesos que afectan a las cuencas es la pérdida de suelo o erosión, la cual se define como el proceso de separación y transporte de partículas del suelo (especialmente las más finas y fértiles) provocadas por la acción del agua y el viento, y en ocasiones por los animales y las actividades del hombre, estas últimas pueden acelerar de manera considerable este proceso, debido a la exposición del suelo por falta de cobertura vegetal.

Pierson (2000) define la erosión del suelo como un fenómeno natural, el cual es causado por el rompimiento de los agregados y el transporte de las partículas finas resultantes a otros lugares, dando pie a la pérdida de una capa de suelo, la cual ayuda a la desertificación; además de que las partículas arrastradas pueden actuar como un vehículo de transmisión de contaminación (plaguicidas, metales, nutrientes, minerales, etcétera).

Dado que la erosión puede ser provocada por diversos factores como el viento y la lluvia, entre otros, este trabajo está enfocado a la erosión provocada por el agua, es decir, la erosión hídrica, la cual se puede dividir en tres categorías principales:

- *Erosión superficial o laminar*: Es el tipo de erosión más dañino, apenas se nota, ya que lo que se pierde es una capa pareja (o similar) a lo largo y ancho de toda la superficie.
- *Erosión por surcos*: Es notable fácilmente, en ésta los chorros de agua corren cuesta abajo formando pequeños surcos y arrastrando algunos centímetros de tierra.

- *Erosión por cárcavas y zanjones*: donde los chorros de agua corriendo cuesta abajo se unen en las hondonadas del terreno hasta formar grandes corrientes, éstas arrastran grandes cantidades de tierra y forman zanjones.

La Tabla 2 muestra la clasificación de la erosión según la FAO (1980), donde se toma en cuenta que una lámina de 1 mm equivale a 10 ton/ha de suelo, de acuerdo a la severidad del suelo.

Ton/ha/año	Grado de erosión
< 10	Nula o ligera
10 - 50	Moderada
50 - 200	Alta
>200	Muy Alta

Tabla 2. Clasificación del grado de erosión.
Fuente: FAO (1980)

Para estimar el grado de erosión o pérdida de suelo de un determinado lugar es necesario contemplar las condiciones de múltiples factores como son la topografía, la lluvia, el escurrimiento y el suelo, y para esto se hace uso de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo o USLE (Universal Soil Loss Equation).

3.5.1. Ecuación Universal de Pérdida de Suelo

El sistema de la Ecuación de Pérdida de Suelo permite estimar el grado de erosión de un determinado lugar. La propuesta de Wischmeier y Smith (1978) es un modelo empírico que al estimar la erosión potencial de un año en una superficie determinada, nos sirve como instrumento para la planificación y la toma de decisiones en diferentes niveles, para el manejo y conservación del suelo.

El modelo de pérdida de suelo permite estimar la cantidad de suelo que se pierde anualmente (grado de erosión) de un determinado lugar, causado por la precipitación y el escurrimiento, tomando en cuenta que la fuerza que provoca la erosión es la de las gotas de lluvia que caen al suelo y se genera un flujo a través de la superficie; dicha erosión se presenta en forma laminar, surcos o cárcavas.

En la ecuación de pérdida de suelo se define como:

$$A = R K L S C P$$

Fórmula 6. Ecuación Universal de Pérdida de Suelo.

donde:

A: Pérdida de suelo (ton/ha)

R: Índice de erosividad asociado a la lluvia (ton/ha).

K: Factor de erodabilidad del suelo (ton/ha).

L: Longitud de la pendiente (m).

S: Porcentaje de pendiente (%).

C: Factor relativo a la cobertura vegetal u otros materiales que impidan el impacto de la lluvia en el suelo desnudo.

P: Prácticas mecánicas de control de la erosión y conservación de suelos.

Para el cálculo de los factores existen diferentes métodos, esto de acuerdo al tipo de información con la que se cuente, así como las características de la zona de estudio.

3.5.1.1. *Factor R*

Es un factor relacionado con el clima y se define como la capacidad de la lluvia para generar erosión, por tal motivo se denomina factor de erosividad el cual está relacionado con las condiciones climáticas del mismo. Para el cálculo de este factor se correlacionarán los datos de precipitación anual (*P*) con los valores de *R* estimados en el país (Tabla 3 y Figura 4), utilizando la información de intensidad de la lluvia disponible (Cortés, 1991).

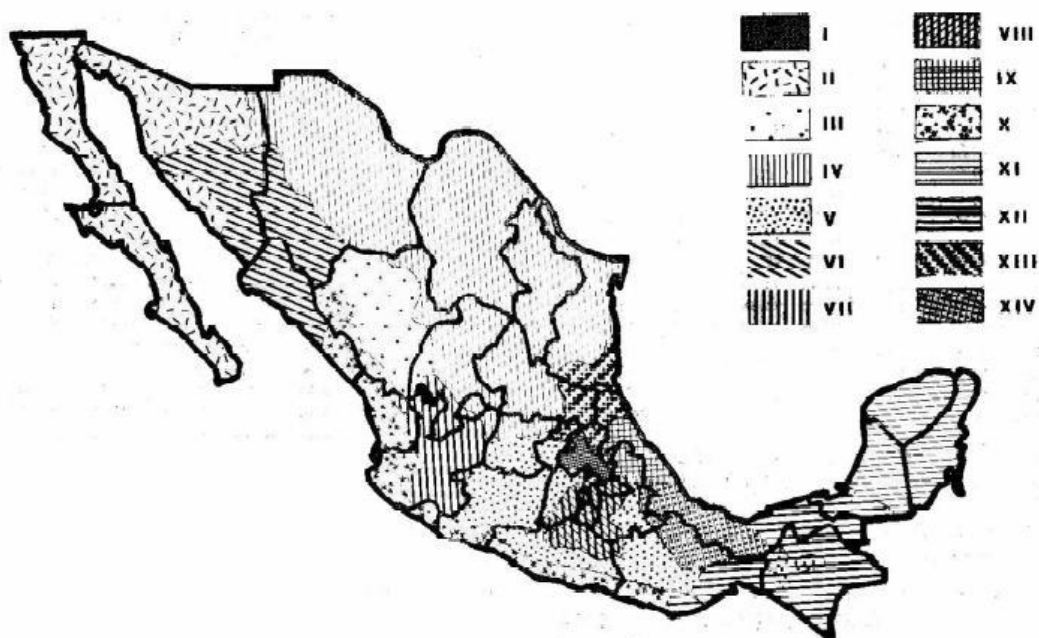


Figura 4. Mapa de regiones con igual erosividad en la República Mexicana. Cortés (1991).

Región	Ecuación	R ²
I	$R = 2.8559P + 0.002983P^2$	0.92
II	$R = 3.4555P + 0.006470P^2$	0.93
III	$R = 3.6752P + 0.001720P^2$	0.94
IV	$R = 1.2078P + 0.002276P^2$	0.92
V	$R = 3.4880P - 0.000188P^2$	0.94
VI	$R = 6.6847P + 0.001680P^2$	0.90
VII	$R = -0.0334P + 0.006661P^2$	0.98
VIII	$R = 1.9967P + 0.003270P^2$	0.98
IX	$R = 7.0458P - 0.002096P^2$	0.97
X	$R = 6.8938P + 0.000442P^2$	0.95
XI	$R = 3.7745P + 0.004540P^2$	0.98
XII	$R = 2.4619P + 0.006067P^2$	0.96
XIII	$R = 10.7427P - 0.00108P^2$	0.97
XIV	$R = 1.5005P + 0.002640P^2$	0.95

Tabla 3. Ecuaciones para estimar la erosividad de la lluvia "R" en la República Mexicana.

3.5.1.2. Factor K

Los suelos son susceptibles a erosionarse debido a las partículas que lo componen, de la materia orgánica, la permeabilidad, la estructura, en particular del tamaño de los complementos. Debido a la carencia de datos para la evaluación de este factor, FAO (1980) propone una metodología donde el factor K es calculado con base a la textura de la superficie, el cual se lista en la tabla 4.

ORDEN	TEXTURA*			ORDEN	TEXTURA		
	Gruesa	Media	Fina		Gruesa	Media	Fina
A	0.026	0.040	0.013	Lo	0.026	0.040	0.013
Af	0.013	0.020	0.007	Lp	0.053	0.079	0.026
Ag	0.026	0.030	0.013	Lv	0.053	0.079	0.026
Ab	0.013	0.020	0.007	M(g,a)	0.026	0.040	0.013
Ao	0.026	0.040	0.013	N(d,e,b)	0.013	0.020	0.007
Ap	0.053	0.079	0.026	O(d,e,x)	0.013	0.020	0.007
B	0.026	0.040	0.013	P	0.053	0.079	0.026
Bc	0.026	0.040	0.013	Pf	0.053	0.079	0.026
Bd	0.026	0.040	0.013	Pg	0.053	0.079	0.026
Be	0.026	0.040	0.013	Ph	0.026	0.040	0.013
Bf	0.013	0.020	0.007	Pl	0.026	0.040	0.013
Bg	0.026	0.040	0.013	Po	0.053	0.079	0.026
Bh	0.013	0.020	0.007	Pp	0.053	0.079	0.026
Bk	0.026	0.040	0.013	Q(a,c,f,l)	0.013	0.020	0.007
Bv	0.053	0.079	0.026	R	0.026	0.040	0.013
Bx	0.053	0.079	0.026	Re	0.026	0.040	0.013
C(g,h,b,l)	0.013	0.020	0.007	Rc	0.013	0.020	0.007
D(d,e,g)	0.053	0.079	0.026	Rd	0.026	0.040	0.013
E	0.013	0.020	0.007	Rx	0.053	0.079	0.026
F(a,b,o,p,r)	0.013	0.020	0.007	S	0.053	0.079	0.026
G	0.026	0.040	0.013	Sg	0.053	0.079	0.026

ORDEN	TEXTURA*			ORDEN	TEXTURA		
	Gruesa	Media	Fina		Gruesa	Media	Fina
Gc	0.013	0.020	0.007	Sm	0.026	0.040	0.013
Gd	0.026	0.040	0.013	So	0.053	0.079	0.026
Ge	0.026	0.040	0.013	T	0.026	0.040	0.013
Gh	0.013	0.020	0.007	Th	0.013	0.020	0.007
Gm	0.013	0.020	0.007	Tm	0.013	0.020	0.007
Gp	0.053	0.079	0.026	To	0.026	0.040	0.013
Gx	0.053	0.079	0.026	Tv	0.026	0.040	0.013
Gv	0.053	0.079	0.026	U	0.013	0.020	0.007
H(c,g,h,l)	0.013	0.020	0.007	V(c,p)	0.053	0.079	0.026
I	0.013	0.020	0.007	W	0.053	0.079	0.026
J	0.026	0.040	0.013	Wd	0.053	0.079	0.026
Jc	0.013	0.020	0.007	We	0.053	0.079	0.026
Jd	0.026	0.040	0.013	Wh	0.026	0.040	0.013
Je	0.026	0.040	0.013	Wm	0.026	0.040	0.013
Jt	0.053	0.079	0.026	Wx	0.053	0.079	0.026
Jp	0.053	0.079	0.026	X(b,k,l,y)	0.053	0.079	0.026
K(h,k,l)	0.026	0.040	0.013	Y(h,k,l,y,t)	0.053	0.079	0.026
L	0.026	0.040	0.013	Z	0.026	0.040	0.013
La	0.053	0.079	0.026	Zg	0.026	0.040	0.013
Lc	0.026	0.040	0.013	Zm	0.013	0.020	0.007
Lf	0.013	0.020	0.007	Zc	0.026	0.040	0.013
Lg	0.026	0.040	0.013	Zt	0.053	0.079	0.026
Lk	0.026	0.040	0.013				

Tabla 4. Valores de K en función de la unidad del suelo y su textura superficial.

Fuente: FAO, 1980

3.5.1.3. Factor L

Es uno de los componentes del factor topográfico sobre la erosión y está representado por la longitud (L) que se define como la distancia desde el punto de origen de un escurrimiento hasta el punto donde decrece la pendiente hasta que ocurre el depósito, o bien, hasta el punto donde el escurrimiento encuentra un canal de salida (Domínguez, 2000).

Renard *et al* (1997) demostró después de múltiples datos experimentales que la longitud (L) varía de acuerdo a la fórmula:

$$L = (\lambda/22.13)^m$$

Fórmula 7. Longitud.

donde:

λ : es la longitud de la pendiente proyectada horizontalmente.

m : es el exponente que varía de acuerdo a la pendiente.

Para la estimación m , Mitchell (1984) propone valores en función de la pendiente, los cuales se muestran en la Tabla 5.

Valor del exponente m	Pendiente del terreno (%)
0.5	> 5
0.4	3 – 5
0.3	1 - 3
0.2	< 1

Tabla 5. Valores de m en función de la pendiente del terreno

Para obtener el valor de λ es necesario disponer de la dirección de flujo del terreno, y así se le asignan los siguientes valores de acuerdo a la dirección:

- $\lambda = 10$; si dirección de flujo es Este, oeste, norte o sur.
- $\lambda = 14.1421$; si la dirección de flujo es sureste, noreste, suroeste o noroeste.

3.5.1.4. *Factor S*

Es el segundo factor topográfico sobre la erosión y está relacionado con el grado de la pendiente (S) del terreno, este factor refleja la influencia de esta última en la erosión, ya que el potencial de erosión incrementa con la pendiente. Se calcula mediante la Fórmula 8:

$$S = 0.065 + 0.045s + 0.0065s^2$$

Fórmula 8. Grado de pendiente (S).

donde:

s: es la pendiente en porcentaje

Para efectos de cálculos el factor L se multiplica por el factor S, para obtener el factor LS.

3.5.1.5. *Factor C*

El factor C está relacionado con la cobertura vegetal y el efecto sobre la erosión. Se define como la relación entre el valor medio de las pérdidas de suelo en un campo cultivado o con vegetación y las pérdidas en una parcela sometida a barbecho continuo en condiciones idénticas de lluvia, suelo y topografía en ambas situaciones. Por tanto, C es menor a uno, e indica que a medida que aumenta la cobertura vegetal, se reduce tomando valores cercanos a cero. Es decir, cuando el valor de C es igual a 0 significa que el suelo está protegido y que tiene pocas posibilidades de erosionarse, en cambio cuando el valor es cercano a 1, tiene altas probabilidades de erosión alta. Aunque el efecto de C varía a lo largo del año, es una práctica común el adoptar un valor promedio anual, únicamente en función de las características de la cobertura vegetal.

En la tabla 6 se muestran los valores para el factor C propuestos por Figueroa *et al.* (1991), los cuales fueron adaptados por SEDESU para el estado de Querétaro.

Uso de suelo y vegetación	Factor C
Agricultura riego.	0.528
Agricultura temporal	0.528
Bosque de encino	0.044
Bosque de encino - pino perturbado	0.044
Bosque de encino perturbado	0.025
Bosque de pino	0.045
Bosque de pino - encino	0.044
Bosque de pino perturbado	0.025
Bosque de táscate	0.430
Bosque de táscate perturbado	0.430
Bosque mesófilo de montaña	0.110
Bosque mesofilo de montaña perturbado	0.110
Bosque mixto	0.040
Bosque tropical caducifolio	0.315
Bosque tropical caducifolio perturbado	0.325
Bosque tropical perenifolio	0.110
Bosque tropical subperenifolio	0.110
Bosque tropical subperenifolio perturbado	0.110
Chaparral	0.065
Cuerpo de agua	0.000
Matorral crasicaule	0.065
Matorral crasicaule perturbado	0.025
Matorral espinoso	0.065
Matorral espinoso perturbado	0.025

Uso de suelo y vegetación	Factor C
Matorral inerme	0.065
Matorral inerme perturbado	0.025
Matorral micrófilo	0.065
Matorral micrófilo perturbado	0.025
Matorral rosetófilo	0.065
Matorral rosetófilo perturbado	0.025
Matorral subinerme	0.065
Matorral subinerme perturbado	0.025
Pastizal inducido	0.549
Pastizal natural	0.549
Cauce	0.780
Sin vegetación	1.000
Zona industrial	0.000
Zona urbana	0.000

Tabla 6. Valores para el factor C.
Fuente: Figueroa *et al.* (1991), adaptados por SEDESU para Qro.

3.5.1.6. Factor *P*

Cuando se implementan obras de conservación de suelo, se presenta una reducción en cuanto a pérdida de suelo se refiere, este efecto es valorado a través del factor *P*.

El factor *P* permite evaluar las obras de conservación para la reducción de erosión empleadas. Toma un valor de 1 en el peor de los casos, cuando no existe ninguna práctica y valores cercanos a 0 cuando se implementan obras de manera adecuada. FAO (1980) propone valores para el factor *P* de acuerdo a la pendiente del terreno y las prácticas utilizadas (Tabla 7).

Práctica de conservación	Pendiente (%)	<i>P</i>
Surcado al contorno	0- 2	0.75 - 0.90
Surcos rectos	0- 2	0.80 - 0.95
Franjas al contorno	0 - 24	0.60 – 0.80
Terrazas	2 - 7	0.10
Terrazas	7 - 13	0.12
Terrazas	> 13	0.16

Tabla 7. Valores para el factor P.
Fuente: FAO, 1980.

Finalmente, para obtener la pérdida de suelo (*A*) se multiplican todos los factores anteriormente descritos. Sin embargo y debido a que en muchas ocasiones no se tienen registradas las obras de conservación, el cálculo de la pérdida de erosión se hace únicamente con los factores *R*, *K*, *L* y *S*, y con esto se obtiene la erosión potencial. Si se involucra el factor *C*, suele llamarse erosión actual; de esta forma y con ayuda de la clasificación de la Tabla 2 se tiene la estimación del grado de erosión de una determinada superficie.

3.6. Indicadores Poblacionales

Los indicadores poblacionales constituyen una herramienta para contar con información relevante y oportuna para la toma de decisiones.

En el caso del Plan Rector de Producción y Conservación (PRPC) es importante contemplar factores relevantes de las localidades en las zonas de estudio, para ello se contemplaron los indicadores descritos adelante como parte del marco social, dichos indicadores están relacionados con la población, vivienda y servicios públicos.

Mondragón (2002) menciona que no existe una definición oficial por parte de algún organismo nacional o internacional, sin embargo existen algunas referencias como la de la Organización de las Naciones Unidas (2002) que describe a un indicador como:

“Herramientas para clasificar y definir, de forma más precisa, objetivos e impactos (...) son medidas verificables de cambio o resultado (...) diseñadas para contar con un estándar contra el cual evaluar, estimar o demostrar el progreso (...) con respecto a metas establecidas, facilitan el reparto de insumos, produciendo (...) productos y alcanzando objetivos”.

Además, Horn (1993) señala que existe una definición que es utilizada por diferentes organismos y autores, dicha aportación corresponde a Bauer (1966):

“Los indicadores sociales (...) son estadísticas, serie estadística o cualquier forma de indicación que nos facilita estudiar dónde estamos y hacia dónde nos dirigimos con respecto a determinados objetivos y metas, así como evaluar programas específicos y determinar su impacto”.

Los indicadores pueden ser cualitativos o cuantitativos, en este trabajo nos enfocaremos únicamente a los segundos.

Los indicadores son elementales para evaluar, dar seguimiento y predecir tendencias de la situación de un país, un estado o una región en lo referente a su economía, sociedad, desarrollo humano, etc., así como para valorar el desempeño institucional encaminado a lograr las metas y objetivos fijados en cada uno de los ámbitos de acción de los programas de gobierno (Mondragón, 2002).

A continuación se identifican los conceptos y variables del II Censo de Población y Vivienda 2005 necesarios para la construcción de los siguientes indicadores socioeconómicos de acuerdo con el Consejo Nacional de Población (2005).

Vivienda. Lugar delimitado por paredes y cubierto por techos con entrada independiente, donde generalmente las personas comen, preparan alimentos, duermen y se protegen del ambiente. Las viviendas se clasifican en particulares y colectivas. Las viviendas particulares son aquellas destinadas al alojamiento de una o más personas que forman uno o más hogares. Las colectivas son las edificaciones utilizadas para alojar personas sujetas a normas de convivencia y comportamiento por motivos de salud, educación, disciplina, readaptación, religión, trabajo y asistencia, entre otras; las personas que se alojan en estas viviendas comparten un objetivo o interés común; o bien, cumplen disposiciones legales o militares, de acuerdo con el INEGI, II Censo de Población y Vivienda, 2005.

Cabe señalar que existe una diferencia entre la clasificación de las viviendas particulares habitadas entre el Censo de 2000 y el II Censo de 2005, además de la clasificación del Censo de las viviendas habitadas en: casas independientes, departamentos en edificios, viviendas en vecindades, cuartos de azoteas, locales no construidos para habitación y viviendas móviles, en el II Censo se incluyen a las viviendas particulares a las viviendas móviles y los locales no construidos para habitación, independientemente que al momento de la entrevista estén siendo utilizados total o parcialmente para vivir.

Drenaje. Sistema de tuberías que permiten desalojar fuera de la vivienda las aguas utilizadas en el sanitario o excusado, en el fregadero, en la regadera o en otras instalaciones similares. También se le conoce como cañería, caño, resumidero o albañal. INEGI en el II Censo de Población y Vivienda del 2005 y de acuerdo con la disponibilidad de drenaje, las viviendas se clasifican en:

- Dispone de drenaje conectado a:
 - Red pública,
 - Fosa séptica,
 - Barranca o grieta, y
 - Río, lago o mar;
- No dispone de drenaje; y
- No especificado.

Excusado o sanitario. Instalación sanitaria destinada al desalojo de los desechos humanos. También se le conoce como retrete, letrina u hoyo negro. La disponibilidad de excusado o sanitario se clasifica en:

- Disponen de excusado o sanitario:
 - Con descarga directa de agua,
 - Con descarga manual de agua,
 - Sin admisión de agua, y
 - No especificado;
- No disponen de excusado o sanitario; y
- No especificado

Disponibilidad de energía eléctrica. Clasificación de las viviendas particulares habitadas según la existencia de energía eléctrica para alumbrar la vivienda, independientemente de la fuente de donde provenga.

En función de este servicio, las viviendas se clasifican, simplemente, entre las que disponen de energía eléctrica y aquellas que no disponen de energía eléctrica (INEGI, 2005).

Disponibilidad de agua. Clasificación de las viviendas particulares habitadas de acuerdo con la forma en la que sus ocupantes se abastecen de agua para la realización de sus actividades cotidianas. Conforme el acceso de los ocupantes de las viviendas al agua, éstas se clasifican en:

- Dispone de agua de la red pública dentro de la vivienda,
- Dispone de agua de la red pública fuera de la vivienda pero dentro del terreno,
- Dispone de agua de una llave pública o hidrante,
- Dispone de agua de otra vivienda,
- Dispone de agua de pipa,
- Dispone de agua de pozo,
- Dispone de agua de río, arroyo, lago u otro, y
- No especificado.

Dormitorio. Cuarto de la vivienda que se utiliza para dormir, independientemente de que allí se realicen otras actividades.

Localidad. Todo lugar ocupado con una o más viviendas, las cuales pueden estar habitadas o no; este lugar es reconocido por la ley o la costumbre. De acuerdo con sus características y con fines estadísticos, se clasifican en urbanas y rurales.

Los indicadores socioeconómicos que se contemplan en el presente estudio se describen a continuación de acuerdo al INEGI y al Consejo Nacional de Población (2005):

3.6.1. Tasa de crecimiento demográfico en una cuenca

Se define a la tasa de crecimiento demográfico como el aumento de la población de un determinado territorio (país, región, provincia, ciudad, municipio, etc.) durante cierto período, normalmente, un año; se expresa generalmente como porcentaje de la población al inicio de cada período o año, aunque hay países que este dato lo refieren a la mitad de cada año.

$$TCD = \frac{\text{Población actual} - \text{Población del año pasado}}{\text{Población del año pasado}} * 100$$

Fórmula 9. Tasa de crecimiento demográfico.

Las tasas de crecimiento se calculan como promedios anuales y se presentan como porcentajes.

3.6.2. Densidad de población en una cuenca

La densidad de población se define como la relación entre un espacio determinado y el número de personas que lo habitan.

Existe una distribución desigual de los habitantes en México y en todo el mundo, hay espacios donde se concentra mucha gente y otras donde es poca; como ejemplo y con datos de INEGI, se encuentra el estado de Chihuahua, cuenta con una extensión territorial de 247,514 km² y tiene una densidad de población de 13 hab/km², a diferencia del Distrito Federal (superficie de 1,486 km²) con 5,877 hab/km²; por tanto es posible decir que las ciudades están más densamente pobladas a diferencia de las localidades rurales.

El cálculo de la densidad de población de una cuenca se obtiene dividiendo el número de habitantes que viven en ella entre el número de kilómetros cuadrados que mide la cuenca.

$$DPC = \frac{PTC (hab)}{ETC (km^2)}$$

Fórmula 10. Densidad de población de una cuenca.

donde:

DPC: es la densidad de población de la cuenca (hab/km²),

PTC: es la población total de la cuenca (hab), y

ETC: es la extensión territorial de la cuenca (km²)

3.6.3. Porcentaje de ocupantes en viviendas particulares sin drenaje ni servicio sanitario en una cuenca (I_{sdys})

El indicador muestra el porcentaje de ocupantes en viviendas particulares que no tienen acceso al drenaje ni a servicio sanitario.

Para el cálculo de este indicador, se identifica el número de ocupantes en viviendas particulares que no disponen de drenaje ni sanitario y se divide entre el total de ocupantes en viviendas particulares menos el número de ocupantes en viviendas particulares donde no se especificó la disponibilidad de drenaje y sanitario:

$$I_{sdys} = \frac{O^{sde}}{O^t - NE^{de}} * 100$$

Fórmula 11. Porcentaje de ocupantes en viviendas particulares sin drenaje ni servicio sanitario en una cuenca.

donde:

O^{sde} : son los ocupantes de viviendas particulares sin disponibilidad de drenaje ni excusado o sanitario.

O^t : es el total de ocupantes en viviendas particulares, y

NE^{de} : son los ocupantes de viviendas particulares donde no se especificó la disponibilidad de drenaje y excusado o sanitario.

3.6.4. Porcentaje de ocupantes en viviendas particulares sin disponibilidad de energía eléctrica en una cuenca (I_{see})

Con el siguiente indicador se obtiene el porcentaje de ocupantes de viviendas particulares sin disponibilidad de energía eléctrica en una cuenca.

Para este caso, se identifica el número de personas que habitan en viviendas sin electricidad y se divide entre las diferencias del total de ocupantes en viviendas particulares menos los ocupantes de viviendas particulares en las cuales el operativo censal no pudo obtener si cuentan o no con energía eléctrica:

$$I_{see} = \frac{O^{see}}{O^t - NE^{ee}} * 100$$

Fórmula 12. Porcentaje de ocupantes en viviendas particulares sin disponibilidad de energía eléctrica en una cuenca.

donde:

O^{see} : son los ocupantes de viviendas particulares sin disponibilidad de energía eléctrica,

O^t : es el total de ocupantes en viviendas particulares, y

NE^{ee} : es el número de ocupantes en viviendas particulares en las que se desconoce si disponen, o no, de energía eléctrica.

3.6.5. Porcentaje de ocupantes en viviendas particulares sin disponibilidad de agua entubada en una cuenca (I_{sae})

El indicador obtiene el porcentaje de ocupantes en viviendas particulares sin disponibilidad de agua entubada en una cuenca.

Para obtener este indicador, una vez que se identifica el número de ocupantes en viviendas particulares que no disponen de agua entubada, se divide

entre el total de ocupantes en viviendas particulares menos el total de ocupantes en viviendas en las que no se especifica la disponibilidad de agua entubada:

$$I_{sae} = \frac{O^{sa}}{O^t - NE^a} * 100$$

Fórmula 13. Porcentaje de ocupantes en viviendas particulares sin disponibilidad de agua entubada en una cuenca.

donde:

O^{sa} : son los ocupantes de viviendas particulares sin disponibilidad de agua entubada,

O^t : es el total de ocupantes en viviendas particulares, y

NE^a : son ocupantes de viviendas particulares en las que no se especifica la disponibilidad de agua entubada.

3.6.6. Porcentaje de ocupantes en viviendas particulares con algún nivel de hacinamiento en una cuenca (I_{nh})

Con este indicador se calcula el porcentaje de ocupantes en viviendas particulares con algún nivel de hacinamiento en una cuenca.

Para el cálculo del número de viviendas con algún nivel de hacinamiento se sumaron los siguientes cuatro grupos de viviendas:

- Viviendas con sólo un cuarto dormitorio y con tres o más ocupantes.
- Viviendas con dos cuartos-dormitorio y con cinco o más ocupantes.
- Viviendas con tres dormitorios y con siete o más ocupantes.
- Viviendas con cuatro cuartos-dormitorio y con nueve o más ocupantes.

Este total de viviendas con algún nivel de hacinamiento, se divide entre la diferencia del total de viviendas particulares menos las viviendas para las cuales no se especifica el número de dormitorios:

$$I_{nh} = \frac{V^h}{V^t - NE^d} * 100$$

Fórmula 14. Porcentaje de ocupantes en viviendas particulares con algún nivel de hacinamiento en una cuenca.

donde:

V^h : son las viviendas particulares con algún nivel de hacinamiento,

V^t : es el total de viviendas particulares, y

NE^d : son las viviendas particulares para las cuales no se especifica el número de cuartos-dormitorio.

CAPÍTULO IV. PROGRAMACIÓN DE UNA BARRA DE HERRAMIENTAS DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS PARA ARCMAP (ARCGIS DESKTOP)

ArcGIS es una familia integrada de sistemas de información geográfica; como plataforma para construir SIG's, permite extender el sistema para mejorar la capacidad en áreas de geoprocésamiento, visualización 3D y desarrollo de herramientas. ArcGIS Engine y ArcGIS Server hacen de ArcGIS un sistema completo para aplicaciones específicas y desarrollo en servidores, respectivamente.

Dado que ArcGIS es un completo y robusto sistema de información geográfica que permite integrar aplicaciones de acuerdo a las necesidades del usuario y que gracias a esto es uno de los software's más usados en los distintos sectores, se ha seleccionado para crear una barra de herramientas relacionada a cuencas hidrográficas.

El software ArcGIS está basado en librerías comunes (ArcObjects) que permiten integrar elementos creados mediante ArcGIS Engine y lenguajes COM, además de acceder a herramientas que realicen en conjunto una serie de operaciones relacionadas a calcular parámetros físicos en polígonos que se traducen en cuencas hidrográficas, las que sirven de apoyo en la realización del diagnóstico de la gran mayoría de los estudios que se realizan en ellas; en este sentido, se ha programado una barra de herramientas para ArcMap (ArcGIS Desktop) llamada "CH-CEHIP".

Existen diversas formas por las cuales se puede personalizar ArcGIS Desktop y mejorar su productividad y funcionamiento. Para el programa que integra la barra de herramientas "CH-CEHIP", se cuenta con tres herramientas con diferentes funcionalidades, para su creación se ha seleccionado a Visual Basic

como lenguaje de programación COM, ya que permite un desarrollo más amplio y es una de las vías para hacer más distribuible el producto final.

De esta forma, Visual Basic es un lenguaje eficaz para ArcGIS, ya que es posible llegar a programas que pueden generar herramientas y aplicaciones capaces de satisfacer necesidades específicas que se transforman en un SIG completo y eficiente, lo que hace que ArcGIS sea uno del software más completo en lo relacionado a datos espaciales.

La barra de herramientas "CH-CEHIP" está dirigida específicamente a los gestores y realizadores de estudios de cuencas, ya que son los responsables del diagnóstico inicial del área de estudio, sin embargo está abierta a estudiantes y personas con una base mínima de conocimiento sobre ArcGIS y cuencas, ya que con lo anterior resulta fácil y amigable de usar.

4.1. Calidad de la Información

El establecimiento del INEGI el 25 de enero de 1983 fue la respuesta del Gobierno de la República para garantizar la mejora sustancial en la calidad y homogeneidad de la información, y además, hacer posible unir esfuerzos de las diferentes instancias y niveles de gobierno en la integración de un sistema nacional que amplió los alcances que puede tener el uso de la información estadística y geográfica en la instrumentación del plan nacional y de los programas sectoriales y regionales de desarrollo.

Lo anterior, bajo la perspectiva de que a finales de los años 70, México no contaba con la suficiente información precisa y detallada sobre la estructura y crecimiento de la economía nacional que le permitiera planear su desarrollo.

En la actualidad, y luego de varios cambios estructurales, INEGI (<http://www.inegi.org.mx>) es una institución autónoma y ha desarrollado un

sistema de información a la vanguardia mundial que está disponible para la sociedad en general. Dado que es un órgano normativo, se rige bajo las normas publicadas en el Diario Oficial de la Federación y que se encuentran en la página oficial de la institución.

Dicho lo anterior, el INEGI ofrece acceso a la información estadística y geográfica de una gran diversidad temática y con distintos niveles de desagregación a través de productos impresos y digitales, tanto en forma gratuita como en venta, siendo esta institución la encargada de administrar y manejar la información de manera oficial.

4.2. Información base

Dentro de la barra de herramientas "CH-CEHIP" se cuenta con tres iconos que realizan tareas específicas relacionadas con cuencas. Las herramientas tienen el objetivo de proporcionar información ya existente, de manera tal que para el usuario sea mucho más fácil el uso de las mismas.

La Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) mediante el Fideicomiso de Riesgo Compartido (FIRCO), ha establecido el "Plan Nacional de Microcuencas" desde febrero de 2002 como una táctica para promover el desarrollo regional.

El enfoque integrado de microcuencas ha sido impulsado por el Plan Nacional de Microcuencas, mediante el desarrollo de los planes de manejo o Planes Rectores de Producción y Conservación (PRPC), llamados de esta manera por FIRCO, donde es indispensable llevar a cabo la caracterización hidrológica de la microcuenca.

Por lo anterior, FIRCO (2005) ha definido los límites de los parteaguas de las microcuencas, de tal manera que el conjunto de herramientas de "CH-CEHIP"

cuenta con los polígonos de dichas microcuencas, de suerte que el usuario pueda seleccionar una de ellas para realizar los cálculos. Cabe mencionar que por razones de este trabajo en específico, solo se precargó la información de microcuencas del Estado de Querétaro, sin embargo es posible contar con la información completa de la República Mexicana.

En el caso de la herramienta de "Erosión Hídrica", se cuenta con la información de edafología, uso de suelo y vegetación, las curvas de nivel y se tomó como base la información de las estaciones climatológicas del estado de Querétaro para generar las isoyetas⁶ con la precipitación media anual.

Para la herramienta "Indicadores Poblacionales" se cuenta con información del II Censo de Población y Vivienda 2005 depurada por el Consejo Nacional de Población para el cálculo del índice de marginación, de donde se obtuvo la información procesada de los indicadores necesarios para el cálculo del índice antes mencionado.

4.3. Correspondencia espacial de la información

Debido a que las herramientas desarrolladas contienen información de tipo georreferenciada y precargada, dicha información está proyectada en el sistema de coordenadas WGS84 con los parámetros de la Tabla 8, es importante que el usuario considere este punto cuando quiera hacer uso de las herramientas.

Sistema de proyección de coordenadas:	WGS 1984 UTM Zona 14N
Proyección	Transverse Mercator
Falso Este	500000.0000000
Falso Norte	0.00000000

⁶ Una isoyeta es una curva que en un mapa une los puntos que reciben la misma cantidad de precipitación (lluvia) en un tiempo determinado. Se puede utilizar para cualquier período de tiempo, desde un período corto hasta la media total anual de lluvia o precipitaciones (Global Foundation for Democracy and Development, 2011).

Sistema de proyección de coordenadas:	WGS 1984 UTM Zona 14N
Meridiano Central	-99.00000000
Factor de escala	0.99960000
Latitud de origen	0.00000000
Unidades lineales	Metros
Sistema de coordenadas geográficas	GCS_WGS_1984
Datum	D_WGS_1984
Primer meridiano	Greenwich
Unidad Angular	Grados

Tabla 8. Datos de proyección de la información.

Sin embargo, en el caso de la herramienta "Caracterización de cuenca" no siempre es indispensable contar con los datos en el sistema de coordenadas anteriormente mencionado, ya que tiene la opción de ingresar su propia información, con la premisa de que se asegure que exista correspondencia espacial entre la misma, es decir, que tengan el mismo sistema de proyección cartográfica y el mismo datum geodésico, de lo contrario, no será posible realizar ningún cálculo.

4.4. Programación de las herramientas

Gracias a las bondades que permite ArcGIS de crear herramientas de acuerdo a las necesidades del usuario y la libertad de elegir el lenguaje de programación que mejor se adapte a los requerimientos de crear aplicaciones específicas, fue posible la creación de la barra de herramientas para ArcGIS Desktop. Una vez instalada (ver anexo 1 para instalación) la barra de herramientas, es posible acceder a ella como cualquiera de las barras con las que cuenta ArcMap.

La barra de herramientas "CH-CEHIP" consta de tres herramientas, las cuales se describe a continuación.

4.4.1. Caracterización de Cuenca

En el caso de la herramienta "Caracterización de Cuenca", se realizan un conjunto de acciones no visibles para el usuario, ya que este solo proporciona información como:

- **Directorio de trabajo.** Se refiere a una carpeta en el disco duro donde se almacena la información que se genere durante el proceso.
- **Shapefile con el polígono de la cuenca** (o seleccionar la microcuenca del Estado de Querétaro).
- **Shapefile de las curvas de nivel de la cuenca.**
- **Selección del atributo de elevación.** Se selecciona a partir de asignar el shapefile de curvas de nivel.
- **Tamaño de celda (opcional).** Se refiere al tamaño de pixel que tendrá el MDE.

Las acciones no visibles al usuario, así como la información que proporciona son indispensables para el buen funcionamiento de la herramienta, dentro de estas acciones se encuentran subrutinas de validación de entrada, generación y preparación del MDE, el cual es la base para la mayor parte de los cálculos que aquí se realizan; finalmente, se guarda la información de los parámetros en la tabla de atributos del shapefile de la cuenca, además de generar otros archivos como el shapefile de corrientes, el cauce principal y la gráfica de la curva hipsométrica.

Una vez que el usuario da click sobre el botón "Caracterización de cuenca" y se proporciona la información de inicio, se procede a una serie de pasos para llegar al resultado final, dichos procesos se describen a continuación. Cabe mencionar que para el funcionamiento de esta herramienta es indispensable contar con la extensión "Spatial Analyst".

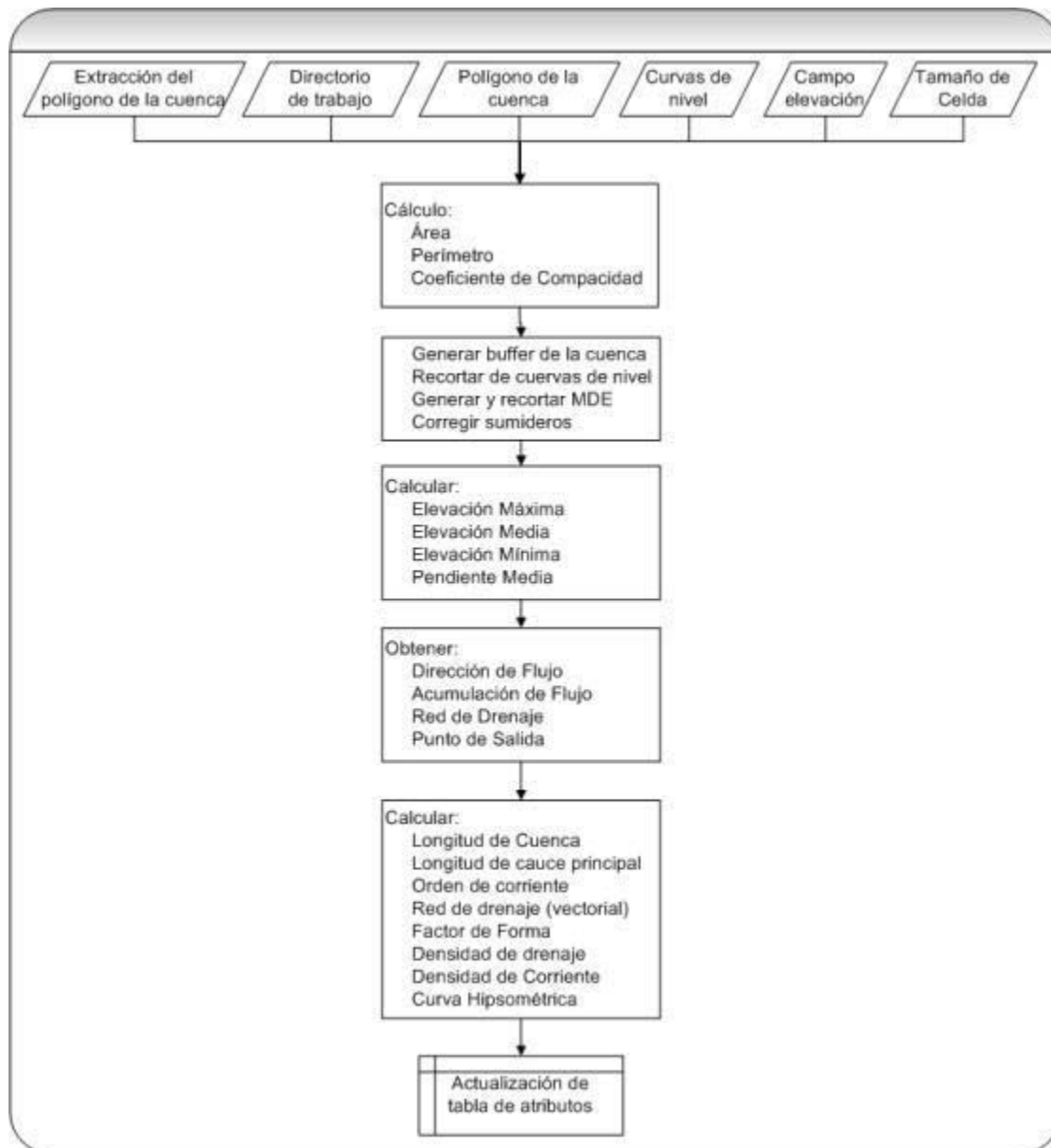


Figura 5. Diagrama de procesos de la herramienta "Caracterización de Cuenca"

4.4.1.1. Cálculo de parámetros

El proceso de obtención de los parámetros es la base fuerte de la programación, ya que es donde se realizan todos los cálculos necesarios para el objetivo de la herramienta. Además de dichos cálculos, se realizan una serie de acciones intermedias que sirven de soporte durante el proceso.

Calculo de área, perímetro y coeficiente de compacidad

Dado que el cálculo del área, perímetro y coeficiente de compacidad solo requieren del polígono de la cuenca, estos se pueden realizar al inicio de todo el proceso.

El área y el perímetro se obtienen mediante el shapefile del polígono de la cuenca a través de los objetos de ArcObject, IArea e ICurve, en el caso del coeficiente de compacidad se aplica la Fórmula 1 con los cálculos antes realizados.

Buffer de la cuenca

Un buffer es un polígono que encierra el área de influencia, resultante de dar una determinada distancia en torno a un punto, línea o polígono, en este caso el polígono de la cuenca; esto con el objetivo de abarcar un área mayor a la de la cuenca para realizar el proceso de interpolación espacial que requiere la elaboración del MDE.

Para obtener el buffer se realiza una llamada a la función "Buffer" de ArcToolbox, asignándole como parámetros el shapefile de la cuenca y una distancia al buffer de 250 m, que es la distancia del parteaguas hacia el exterior.

Recorte del shapefile de las curvas de nivel

Tomando en cuenta que el usuario puede introducir un shapefile de curvas de nivel donde se abarca un área mayor a la de la cuenca y que al momento de realizar el MDE, esto se traduzca en un archivo demasiado grande, se realiza un corte de las curvas de nivel usando como base el polígono del buffer generado anteriormente. Para esta acción se hace un llamado a la función "Clip" con los parámetros antes mencionado.

Generación del Modelo Digital de Elevación (MDE)

Una vez que se cuenta con el shapefile de curvas de nivel al tamaño del buffer, se procede a generar el MDE, para lo cual se hace una llamada a la función "TopoToRaster_sa", que requiere como parámetros el shapefile de las curvas de nivel, el campo de la tabla de datos que contiene la elevación del terreno (es seleccionado por el usuario una vez que introduce el shapefile de curvas de nivel) y finalmente el tamaño de celda del grid de salida, este se ha definido con un valor estándar de 30 m, que es un tamaño típico para curvas de nivel a la escala 1:50,000.

Recorte del MDE

Cuando se crea un MDE, este aparece con una forma cuadrada o rectangular, de tal manera que abarca un área mayor al del polígono de la cuenca, por tanto, se toma como base el polígono de la cuenca y se hace un llamado a la función "ExtractByMask_SA" para obtener un MDE que corresponde a la forma de la cuenca, obteniéndose por tanto el insumo necesario para los cálculos posteriores.

Corrección de sumideros

Un sumidero (sink en inglés) o depresión es una celda (o conjunto de celdas) del MDE a la cual no se le puede asignar una dirección de flujo (ver apartado dirección de flujo), es decir, cuando las ocho celdas vecinas tienen un valor más grande o cuando dos celdas fluyen cíclicamente, ver Figura 6.

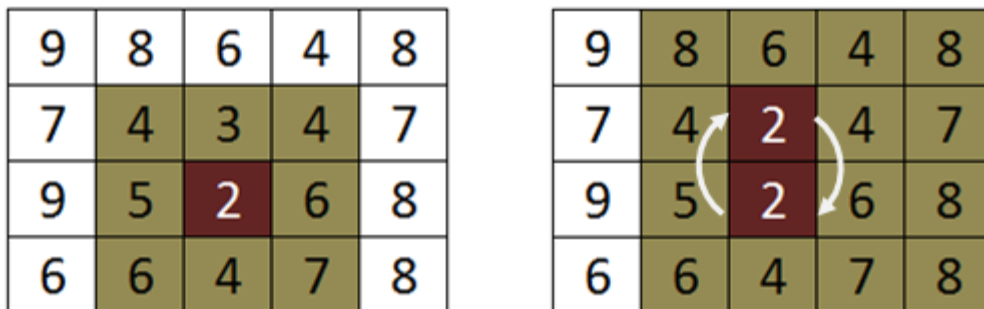


Figura 6. Casos de sumideros en un grid

Estos sumideros son comúnmente errores del proceso de generación del propio MDE, los cuales afectan a la hora de realizar el grid de dirección de flujo. El proceso de corrección de dichos sumideros es iterativo, es decir, cuando una sumidero es llenado puede surgir otro con otros valores, en el caso de la Figura 6, en el cuadro de lado izquierdo, el sumidero es la celda con valor 2, al realizar la corrección toma un valor de 3 y se vuelve el caso cíclico (lado derecho), por ello es iterativo.

Elevación máxima, media y mínima

Una vez que al MDE se ha corregido, se calculan los parámetros de elevación máxima, media y mínima con ayuda del objeto IRasterStatistics la cual arroja las estadísticas del grid con las funciones Minimum, Mean y Maximum.

Pendiente media

Para obtener la pendiente media de la cuenca, se hace uso del grid ya corregido anteriormente, se genera un nuevo grid de pendiente con la función "Slope_sa", la cual identifica la máxima proporción de cambio en valor entre una celda y sus ocho vecinos; el resultado puede ser en porcentaje o grados, en este caso se adopta como unidad a la primera de ellas.

Una vez generado el grid de pendientes en porcentaje se usa el objeto IRasterStatistics y la función Mean para obtener la pendiente media.

Dirección de flujo

El proceso del cálculo de la dirección de flujo consiste en determinar la dirección que toma el escurrimiento según la máxima pendiente hacia abajo de cada celda. Considerando las celdas adyacentes (N, NE, E, SE, S, SO, O, NO), existen ocho direcciones posibles de flujo para una celda dada, las cuales toman los valores de la Figura 7.

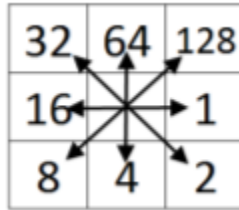


Figura 7. Valores de dirección de flujo

El grid de dirección de flujo se obtiene mediante la función "FlowDirection", donde cada una de las celdas debe tomar uno de los valores de la Figura 7.

Acumulación de flujo

Una vez que se obtiene el grid de dirección de flujo, se procede al cálculo de la acumulación de flujo, el resultado se traduce en un grid donde el atributo de cada celda representa la cantidad de elementos aguas arriba que convergen a ella según las direcciones del flujo; de este modo, es posible conocer rápidamente la cantidad de agua que puede recibir una celda determinada. Asimismo, el cálculo de acumulación de flujo posibilita también determinar la cantidad potencial de agua de lluvia que puede fluir por una celda dada, asumiendo que toda la lluvia se convierte en escurrimiento superficial y que no existe, intercepción, infiltración, evapotranspiración u otras pérdidas de agua.

Para el cálculo del grid de acumulación de flujo es necesario tener el grid de dirección de flujo y aplicar la función FlowAccumulation, lo que produce el grid de acumulación donde cada celda contiene el número de celdas aguas arriba que fluyen hacia ella.

Red de drenaje

La red de drenaje se obtiene primeramente en formato raster, este proviene del grid de acumulación de flujo y contiene en cada una de sus celdas el número de celdas aguas arriba que caen sobre ella.

Para definir el grid de la red de drenaje se establece el umbral mínimo, el cual se define como el número mínimo de elementos aguas arriba que escurren sobre una celda y que se desea visualizar, así, las celdas del grid de la red de drenaje tomarán un valor de 1 cuando el valor de la celda del grid de acumulación de flujo sea mayor o igual al umbral, de lo contrario toma un valor de 0. Para el caso de esta herramienta se estableció un valor típico del umbral de 200, ya que este puede variar dependiente del terreno, en zonas planas probablemente será mayor y en zonas montañosas este umbral puede ser menor.

Punto de salida

El punto de salida se determina mediante el grid de acumulación de flujo, este punto corresponde a la celda que contiene el valor más alto del grid de acumulación. La celda se convierte en un shapefile para tenerlo de referencia en cálculos posteriores.

Longitud de la cuenca

La longitud de la cuenca es la distancia en línea recta desde el punto de salida hacia el parteaguas, esta se calcula con ayuda del punto de salida y la red de drenaje, calculados anteriormente.

Longitud del cauce principal

Este parámetro se calcula a partir del grid de la red de drenaje y con apoyo de la función FlowLength, ya que ésta calcula la distancia acumulada a cada celda a lo largo de una corriente, tomando en cuenta que las distancias diagonales entre celdas son distintas entre las ortogonales; como resultado arroja un grid donde con el objeto IRasterStatistics obtenemos el valor más grande, éste será el del cauce principal.

Orden de corriente

Dentro de las funciones y objetos que ofrece ArcGIS se tiene StreamOrder, el cual asigna un orden numérico a segmentos de un grid de corrientes, esta

función representa las ramificaciones de la red de drenaje y se inspira en el criterio de Horton para obtener el grado de desarrollo de un sistema de drenaje y es conocido como "Orden de Corrientes". Según este procedimiento, el orden de una corriente se incrementa cuando ésta resulta de la unión de dos corrientes tributarias de orden menor.

Red de drenaje vectorial

Anteriormente se calculó la red de drenaje en formato grid, sin embargo para obtener el número y la distancia total de las corrientes es necesario tener la información en formato vectorial, para tal efecto se usa la función StreamToPolyLineFTab. Esta función requiere como parámetros de entrada el grid de dirección de flujo y el grid de la red de drenaje (calculados anteriormente).

Una vez que se tiene en formato grid la red de drenaje, se usa las funciones Count y Length para obtener el número y distancia total de corrientes, respectivamente.

Factor de forma

Como resultado de las etapas anteriores, se cuenta con los parámetros necesarios para calcular el factor de forma; para ello, basta con aplicar la Fórmula 2 descrita en el capítulo III.

Densidad de drenaje y de corrientes

Como en el parámetro anterior, aquí se aplican la Fórmula 3 y Fórmula 4, como insumos se parte de la red de drenaje en formato vectorial y la longitud de la misma, la cual se calcula sumando las longitudes de las corrientes mediante la función Length y con la función "Statistics" se obtiene el número de corrientes o elementos de la red de corrientes vectoriales.

Curva hipsométrica

Para obtener la gráfica de la curva hipsométrica es necesario disponer del MDE de la cuenca (primer grid construido) y definir el número de intervalos de la gráfica, en este caso se adoptó un valor de 50.

Se crea una tabla donde se agregan los intervalos en una columna y el número de celdas que caen en cada una de los intervalos, para finalmente, en una tercera columna, agregar el área que abarca todas las celdas de cada intervalo, es decir, el área es igual al número de celdas por el cuadrado del tamaño de la celda.

Durante el proceso de cálculo de estos parámetros, se va actualizando la tabla de datos del shapefile de la cuenca; es decir, se agregan los campos y sus correspondientes valores para cada parámetro.

4.4.2. Erosión Hídrica

La herramienta "Erosión Hídrica" se programó con el propósito de estimar el grado de erosión hídrica de cuencas, en este caso la aplicación se enfoca a las microcuencas del Estado de Querétaro. El cálculo se hace a partir de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE). Inicia con un cuadro de dialogo donde el usuario introduce la siguiente información:

- **Directorio de trabajo.**

Se refiere a una carpeta que es creada en el disco duro donde se almacenará la información generada durante el proceso.

- **Selección de la microcuenca del Estado de Querétaro**

La herramienta cuenta con información precargada que sirve de soporte a lo largo del proceso de estimación de la erosión hídrica. Entre esta información se encuentra el shapefile de las microcuencas del Estado de Querétaro, un grid de isoyetas de precipitación media anual (obtenida a partir de las estaciones

climatológicas y cuyos valores están en mm/año, véase la Tabla 9) y los shapefile de edafología, uso de suelo y vegetación.

Clave	Estación	Precipitación Media anual (mm)
11053	SAN LUIS DE LA PAZ	458.3
11038	POZOS	493.7
11016	DOCTOR MORA	664.5
11003	LAS ADJUNTAS	709.6
11007	SAN JOSÉ ITURBIDE	518.7
22017	CHICHIMEQUILLAS	482.4
22004	CAMPO AGRICOLA EXP.	555.9
22018	QUERÉTARO	520.9
22025	CORREGIDORA	510.6
22017	EL PORVENIR	500.0
22024	VEGIL	710.1
22006	LOS CUES	529.2
22014	LA PALMA	628.4
22015	PEDRO ESCOBEDO	623.4
22011	PRESA HIDALGO	602.3
22009	GALINDO	609.4
22010	HACIENDA LA "H"	601.7
22020	SAN JUAN DEL RIO	570.9
22002	AMEALCO	633.6
15063	PRESA SAN IDELFONSO	769.4
15044	ÑADO	723.2
15052	POLOTITLAN	617.2
15003	ACULCO	722.2
15007	ARROYO ZARCO	617.2
13048	PRESA BOQUILLA (TECOLOTE)	509.5
13018	HUICHAPAN	437.1
22005	CENTENARIO	514.2
22022	PASO DE TABLAS	539.5
13049	TECOZAUTLA	516.7
	BERNAL	492.6
22003	CADEREYTA	454.0
22023	TOLIMAN	370.9
	VIZARRON	466.0
22008	EL DOCTOR	828.4

Clave	Estación	Precipitación Media anual (mm)
22016	PEÑAMILLER	509.5
22019	SAN JOAQUIN	1091.5
13066	ZIMAPAN	391.1
13020	JACALA	722.8
13037	PISAFLORES	1379.6
22001	AHUACATLAN	992.7
22013	JALPAN	847.2
24014	LOMAS DEL MIRADOR	1506.5
24013	LAGUNILLAS	726.6
13028	MAZACINTLA	421.7
24028	SAN CIRO	788.7
11037	PUERTO PILON	239.6
11065	VILLA VICTORIA	478.2
11052	HACIENDA SAN LUCAS	706.3
11024	JERECUARO	825.7
11040	PUROAGUA	780.9
11041	PUROAGÜITA	689.0
16095	TAMASCALES	780.3
16097	TEPUXTEPEC	830.4
13024	KM 3 SUR MIXQUIAHUALA	544.8
13019	IXMIQUILPAN	360.5
11008	APASEO	602.0
11003	PRESA SOLIS	709.6

Tabla 9. Estaciones climatológicas

Debido a la cantidad de información que maneja esta herramienta, su empleo se ha limitado únicamente al Estado de Querétaro, sin embargo, existe la posibilidad que se pueda cargar información de otros estados.

Para seleccionar una cuenca, se selecciona el estado (aparecen otros además de Querétaro debido a que las cuencas no tienen límites políticos), posteriormente el municipio y finalmente el nombre de la cuenca.

Recorte de la cuenca seleccionada

Mediante la función "SelectByAttributes" usando el nombre de la microcuenca, se selecciona la cuenca deseada y se genera un shapefile con el polígono de dicha microcuenca.

Recorte del grid de isoyetas

Con el polígono de la microcuenca y el grid de isoyetas se aplica la función "ExtractByMask_sa" para obtener las isoyetas de la microcuenca.

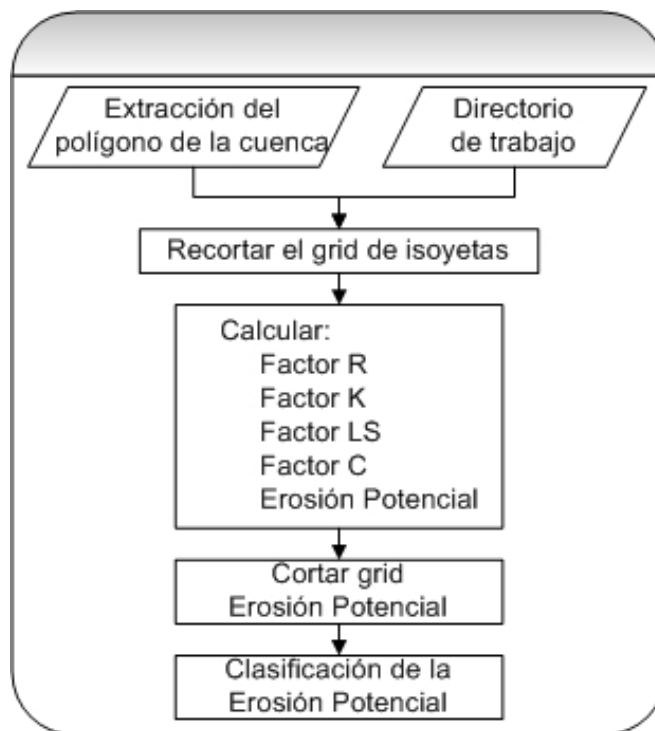


Figura 8. Diagrama de procesos de la herramienta "Erosión Hídrica"

4.4.2.1. Cálculo de factores de la fórmula USLE

Factor *R*

El factor *R* es un indicador climatológico, para su obtención se correlacionan los datos de precipitación media anual (raster isoyetas) con el valor de la Tabla 3. Esto último se obtiene del mapa de regiones con igual erosividad en

la República Mexicana que plantea Cortés en 1991 (Figura 4), se observa que a Querétaro le corresponde la región IV en el noreste y la V al suroeste; con los datos anteriores se selecciona la ecuación correspondiente de la Tabla 3, estas operaciones generan nuevos grid, para tal efecto se usa la función "Map Calculation".

Factor *K*

El factor *K* se estima a partir de la textura superficial y la unidad de suelo, de acuerdo con la clasificación de la FAO (ver Tabla 4)

Tomando en cuenta que el shapefile de edafología ya contiene un campo de textura, se procede a convertir este shapefile a grid (Factor *K*).

Factor *LS*

Como ya se explicó anteriormente, este factor está relacionado con las características topográficas de la cuenca, en sí, con la longitud (*L*) y la pendiente (*S*) del terreno.

Para el cálculo de la *L*, se aplica la Fórmula 7, para ellos es indispensable contar con un grid de pendiente en porcentaje y este se obtiene mediante el MDE y la función "Slope_sa" y como argumentos "PERCENT_RISE".

El siguiente paso es clasificar las pendientes para obtener el valor de *m* de acuerdo a la Tabla 5; los valores de esta variable son arrojados en decimales, pero para lograr su clasificación es importante convertirlos a enteros mediante la función "Int".

A la tabla de datos del grid de pendientes se le agrega un campo "*m*", los valores de este campo depende del campo "VALUE", si el valor es menor a 1, *m* es igual a 0.2, si el valor es de 1 a 3, *m* es igual a 0.3, si el valor es de 3 a 5, *m* es igual a 0.4 y para los valores mayores a 5, *m* es igual a 0.5. Lo siguiente es

generar un grid de aspecto, el cual se genera a partir del MDE y con la función "Aspect_sa", para finalmente aplicar la Fórmula 7 y obtener el factor *L*.

El factor *S* está basado en la inclinación de la pendiente por lo que se aplica la Fórmula 8, donde *S* es la pendiente en porcentaje. Por último, se multiplican los grid *L* y *S* y así se obtiene el grid del factor *LS*.

Factor C

El shapefile de uso de suelo y vegetación contiene un campo con el nombre de factor *C*, mismo que toma valores de acuerdo a la Tabla 6, posteriormente se convierte a formato grid con base al campo antes mencionado.

El factor *P* no es considerado en esta herramienta porque no se cuenta con la información de obras de conservación de suelo que este factor requiere.

Erosión Potencial

La multiplicación de los grids de los factores *R*, *K*, *LS* y *C* nos da como resultado otro grid que al dividirlo entre 100 (el tamaño de celda del MDE es de 30 m) nos arroja un estimado de la pérdida anual de suelo.

Corte del grid de erosión potencial

Puesto que al momento de generar un grid, su resultado se traduce en una malla cuadrada (o rectangular) es necesario cortar dicho grid a la forma de la microcuenca, para lo cual se usa la función "ExtractByMask_sa".

Clasificación de la erosión potencial

Para clasificar el grado de erosión se toma en cuenta que los suelos tienen una densidad típica de 1.6 ton/m³; por tanto, una lámina de 1 mm equivale a 10 ton/ha de suelo perdido. El grid de erosión potencial se clasifica de acuerdo a la

Tabla 2 propuesta por la FAO (1980). Se crea un campo en la tabla de datos del grid de erosión potencial y se le asigna el valor correspondiente.

Durante el proceso de estimación del grado de erosión de la cuenca se realizan una serie de pasos que van generando información intermedia, dicha información no se guarda físicamente en disco, únicamente arroja el grid de erosión potencial y el polígono de la cuenca que se ha seleccionado.

4.4.3. Indicadores Poblacionales

Para el caso de la herramienta de "Indicadores Poblacionales" fue necesario depurar la información proporcionada por el CONAPO, esto se hizo con el fin de utilizar solo los parámetros necesarios para el cálculo de los indicadores descritos en el capítulo III y evitar una base de datos muy extensa.

Esta herramienta despliega un cuadro de diálogo donde el usuario proporciona los siguientes datos de entrada:

- **Directorio de trabajo.** Se refiere a una carpeta en el disco duro donde se almacena la información que se genere durante el proceso.
- **Shapefile con el polígono de la cuenca** (o seleccionar la microcuenca del Estado de Querétaro).
- **Seleccionar los indicadores que desea calcular**

Para obtener el shapefile de la cuenca se tiene dos alternativas, la primera es proporcionar un archivo en formato shapefile que contenga el polígono de una cuenca, con la premisa de la correspondencia espacial y la segunda es que el usuario seleccione la microcuenca del listado que se proporciona para el Estado de Querétaro.

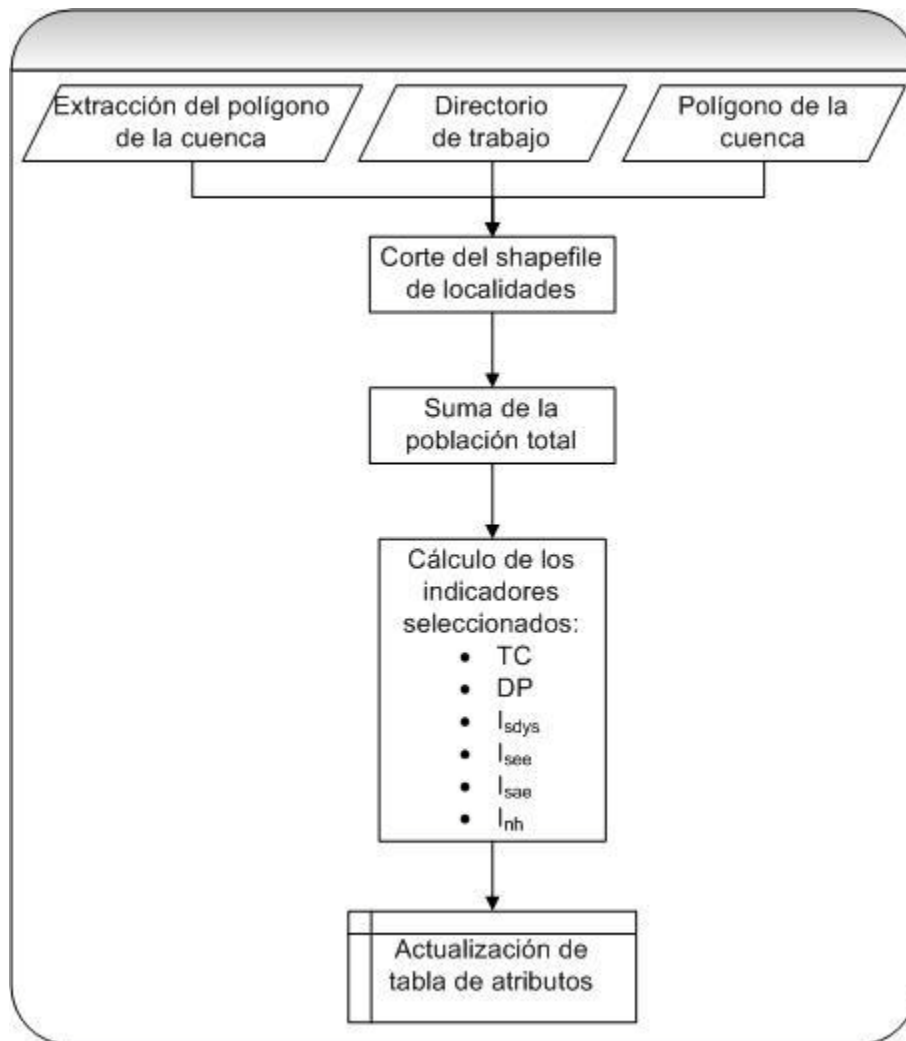


Figura 9. Diagrama de procesos de la herramienta "Indicadores Poblacionales"

4.4.3.1. Obtención de indicadores

A diferencia de las herramientas anteriores, el usuario está en libertad de seleccionar los indicadores que le sean de utilidad dentro de la cuenca. Por tanto se realiza una serie de procesos lineales descritos a continuación.

Extracción del polígono de la cuenca

De la base de datos de microcuencas del Estado de Querétaro, se selecciona la de interés y se procede a hacer una extracción de manera tal que se obtenga un shapefile con el polígono de la microcuenca seleccionada, para esto

se usa la función "SelectByAttributes" con los parámetros de los campos Estado y Municipio.

Corte de las localidades de la microcuenca

Para realizar el corte de las localidades que se encuentran dentro del polígono de la microcuenca se usa la función "SelectByLocation", la cual da como resultado un shapefile únicamente las localidades de la misma.

Suma de la población total

La tabla de atributos del shapefile de localidades contiene un campo "POB_TOT", el cual contiene el número de habitantes de cada una de las localidades, de este paso se hace la suma de la población de total de la microcuenca, es decir de todas las localidades ahí contenidas.

Dado que el usuario está en libertad de seleccionar únicamente los indicadores que desea calcular, los siguientes pasos hacen un chequeo antes de realizar el cálculo, y este se efectúa si esta seleccionada la casilla correspondiente.

Tasa de crecimiento demográfico en una cuenca

El cálculo de la tasa de crecimiento se ha definido mediante la Fórmula 9, la cual implica sumar la población total del año 2005 guardada en el campo "HAB_2005" y la suma de la población total antes calculada, una vez que se aplica la fórmula se crea un campo (Tasa_C) en la tabla de atributos del polígono de microcuenca y se guarda el resultado obtenido.

Densidad de población en una cuenca

Para el cálculo de la densidad de población es necesario obtener el área de la cuenca, con ayuda del objeto IArea, el valor se guarda en el campo "Area_km2", el cual se crea si éste no existe.

Posteriormente se obtiene la densidad de población aplicando la Fórmula 10 y se crea el campo "Den_Pob" en la tabla de atributos de la cuenca, asignándole el valor antes calculado.

Porcentaje de ocupantes en viviendas particulares sin drenaje ni servicio sanitario en una cuenca (I_{sdys})

Cabe mencionar que para este y los indicadores siguiente han sido calculados a nivel localidad por el CONAPO, lo que procede en esta herramienta es calcular los indicadores a nivel cuenca usando la información existente.

El proceso inicia con la suma de todos los elementos del campo de la tabla de datos "SDYE05", posteriormente se divide entre el número de localidades que se encuentran en la cuenca y de esta forma encontramos el porcentaje de ocupantes en viviendas particulares sin drenaje ni servicio sanitario. El resultado obtenido se agrega a la tabla de datos de la cuenca creando el campo "SDREN".

Porcentaje de ocupantes en viviendas particulares sin disponibilidad de energía eléctrica en una cuenca (I_{see})

El I_{see} se calcula sumando los valores del campo "SEE05" de la tabla de datos del shapefile localidades y dividiéndolo entre el número de localidades dentro de la cuenca; se agrega el campo "SEE" a la tabla de datos de shapefile cuenca y el valor resultante de la división es agregado al campo mencionado.

Porcentaje de ocupantes en viviendas particulares sin disponibilidad de agua entubada en una cuenca (I_{sae})

En la tabla de datos del shapefile de localidades se encuentra un campo llamado "SAGUA05", los valores de éste se suman, el resultado se divide con el número de localidades dentro de la microcuenca, el valor obtenido de la operación anterior se agrega a la base de datos del shapefile de cuenca mediante el campos "SAE".

Porcentaje de ocupantes en viviendas particulares con algún nivel de hacinamiento en una cuenca (I_{nh})

Para el cálculo de este indicador se realiza la sumatoria del campo "HACINA05" de la tabla de datos de localidades, la suma es dividida con el número de localidades, posteriormente el resultado se guarda en la tabla de la cuenca en el campo "HACINA", el cual se crea para poder guardar el resultado.

Actualización de la tabla de atributos del shapefile de la cuenca

Una vez hecho el cálculo de los indicadores seleccionados por el usuario, la tabla de atributos del shapefile de la cuenca se actualiza insertando los campos necesarios.

CAPÍTULO V. VALIDACIÓN DE "CH-CEHIP"

Durante el periodo en el que se desarrolló la barra de herramientas "CH-CEHIP" se realizó un constante proceso de pruebas de validación. Ahora bien, dado que regularmente los resultados obtenidos de manera manual son considerados reales o cuando menos cercanos a la realidad, éstos se tomaron en cuenta como una referencia base para validar herramientas. Además, los resultados arrojados por la aplicación (solo en el caso de la herramienta de caracterización), se compararon con los obtenidos con la herramienta DetermHidro (Valtierra, 2007), la cual fue desarrollada para el software ArcView 3.x.

5.1. Selección de microcuencas

Para la validación de resultados, se eligieron cuatro microcuencas del Estado de Querétaro de manera tal que estuvieran distribuidas a lo largo y ancho del estado, además de la microcuenca La Joya, la cual es un caso particular debido a que se trabajó en el reciente Plan Rector de Producción y Conservación (PRPC) de dicha microcuenca, y del cual se obtuvieron datos de caracterización y la cuenca y la estimación del grado de erosión hídrica.

Las microcuencas seleccionadas usadas para la validación de las tres herramientas de "CH-CEHIP" se muestran en la Tabla 10, y gráficamente en la Figura 10.

Microcuenca	Subcuenca	Municipio
Corral Blanco	Alto Pánuco	Cadereyta de Montes
El Tepozán	Alto Pánuco	Arroyo Seco
La "D"	Río San Juan Qro.	Pedro Escobedo
La Joya	Querétaro-Apaseo	Querétaro
San Juan de los Durán	Alto Pánuco	Jalpan de Serra

Tabla 10. Microcuencas seleccionadas para validación.

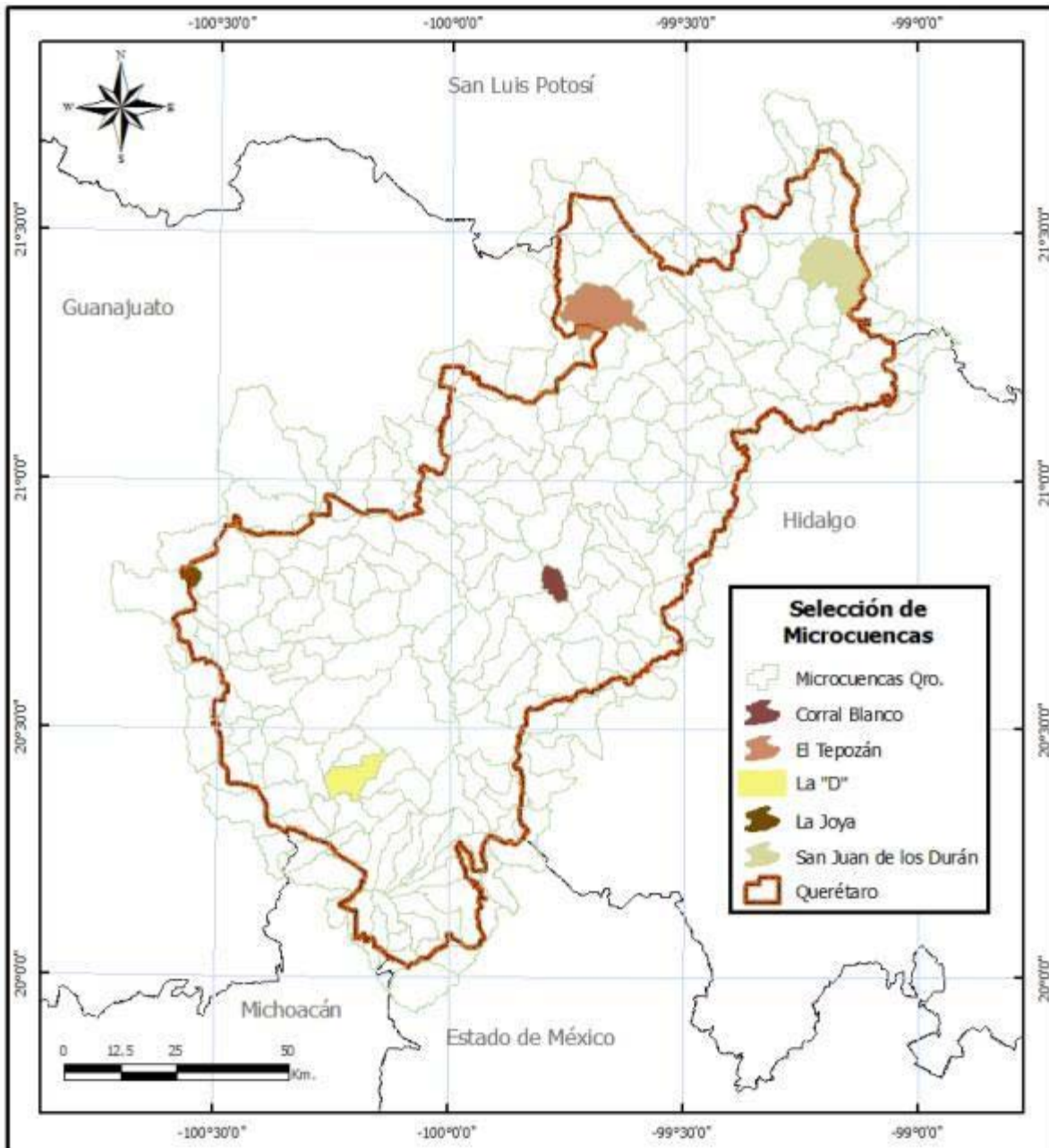


Figura 10. Microcuencas seleccionadas para validación.

Para el cálculo de los parámetros fue necesario contar con la información requerida por las herramientas, para lo cual se contó con cartografía topográfica digital escala 1:50 000 y con el shapefile de las microcuencas del Estado de Querétaro, con base a esta información se procedió a la obtención de resultados de manera tradicional (manual) con el apoyo de ArcMap, así como con las de la barra de herramientas "CH-CEHIP", desarrolladas para este fin.

5.2. Aplicación de la herramienta "Caracterización de Cuenca"

Para la aplicación de esta herramienta se requirió como insumo las curvas de nivel de las microcuencas con el fin de elaborar el Modelo Digital de Elevación (MDE) y posteriormente el cálculo de los parámetros. El cálculo de estos últimos se guarda en la tabla de atributos de la microcuenca, los resultados son comparados con los obtenidos de manera manual y los generados por la herramienta DetermHidro (Valtierra, 2007), a la cual se hará referencia a lo largo de este apartado.

Además de los resultados agregados en la tabla de atributos de las microcuencas seleccionadas, esta herramienta genera la red de drenaje, en la Figura 11. B (A y B) se muestran las cinco microcuencas con la red de drenaje generada por la herramienta "Caracterización de cuenca".

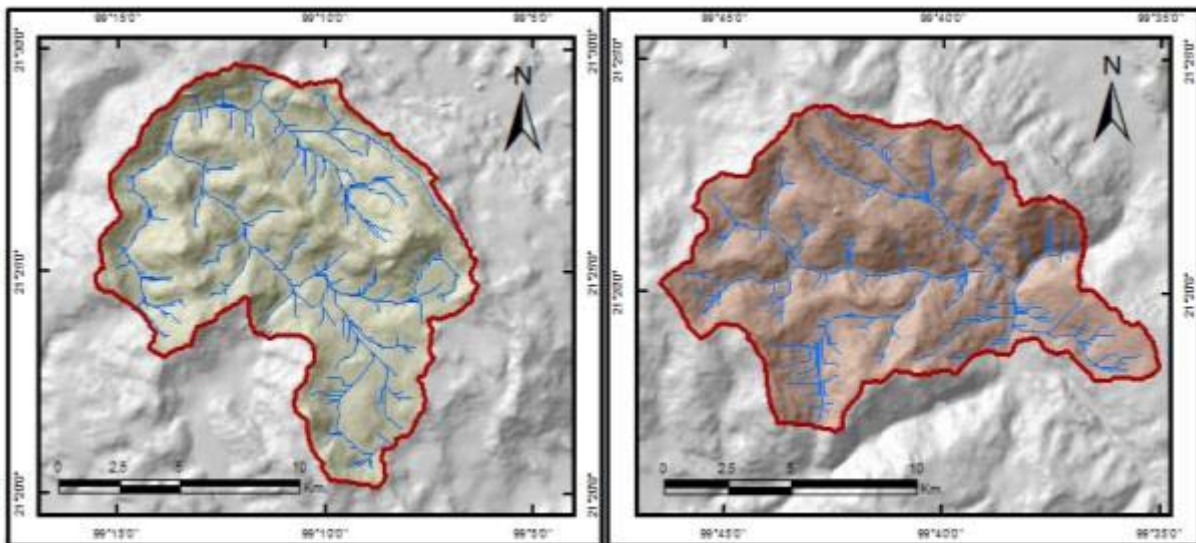


Figura 11. A) Red de drenaje de las cinco microcuencas seleccionadas generada por "Caracterización de cuenca".

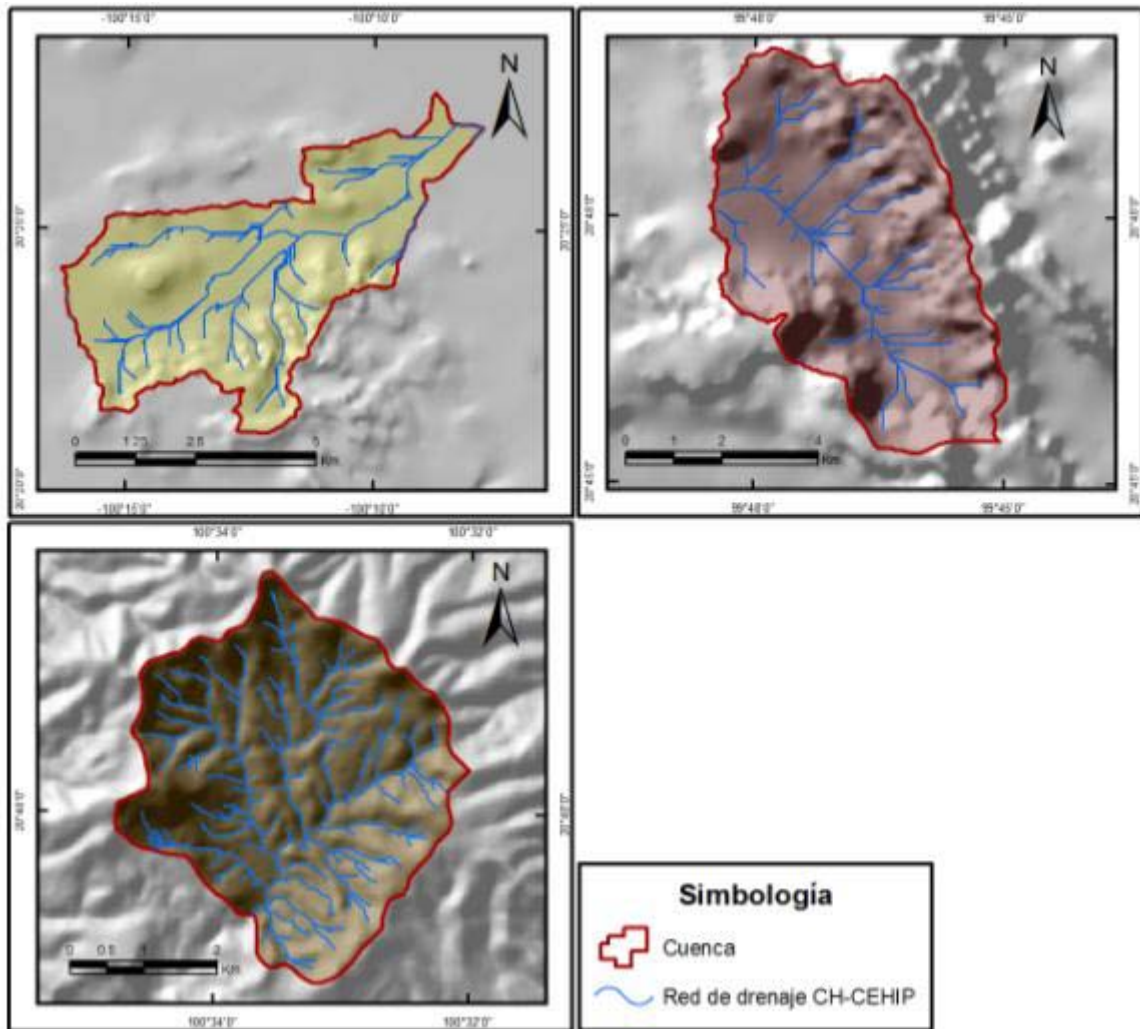


Figura 11. B) Red de drenaje de las cinco microcuencas seleccionadas generada por "Caracterización de cuenca".

A manera de comparación, en la microcuenca La Joya se insertaron la red de drenaje generada por DetermHidro, "Caracterización de cuenca" y la del INEGI, Figura 12.

La red de drenaje del INEGI, en el caso de la microcuenca La Joya, solo cuenta con dos corrientes, esto debido a la escala de la información y a que la microcuenca es muy pequeña.

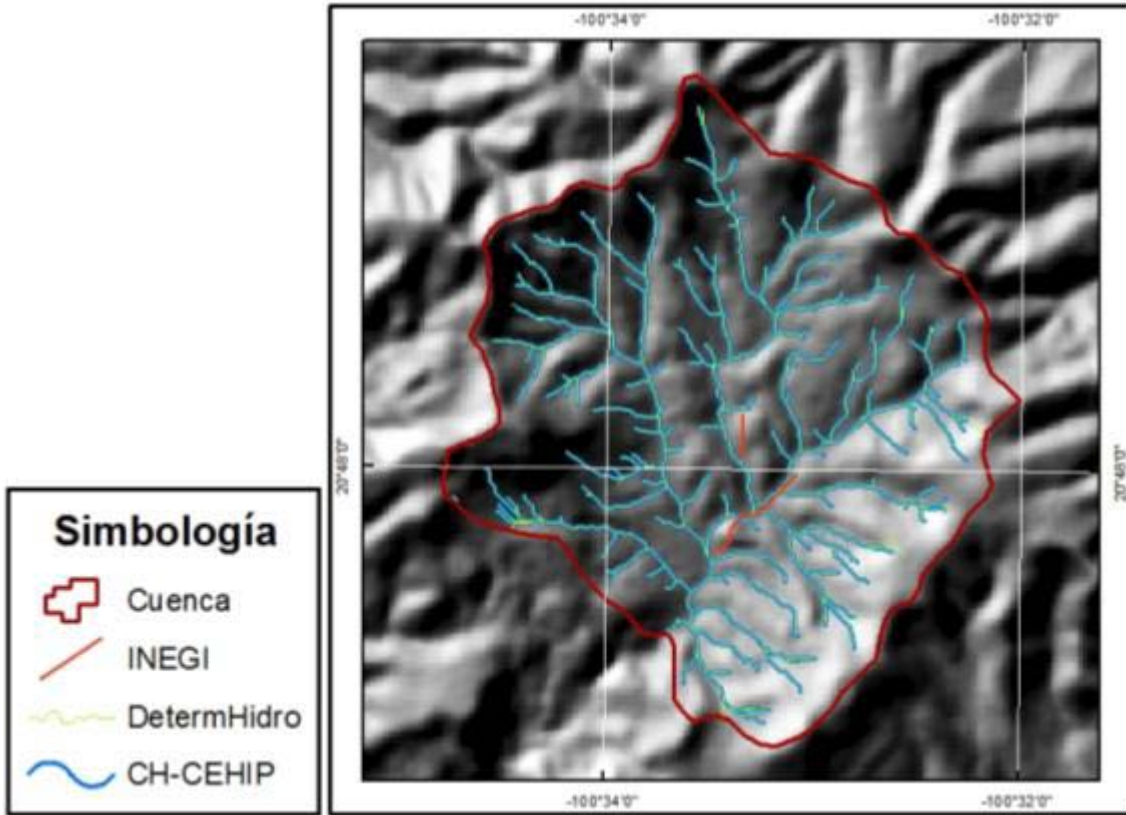


Figura 12. Comparación de la red de drenaje de la microcuenca La Joya.

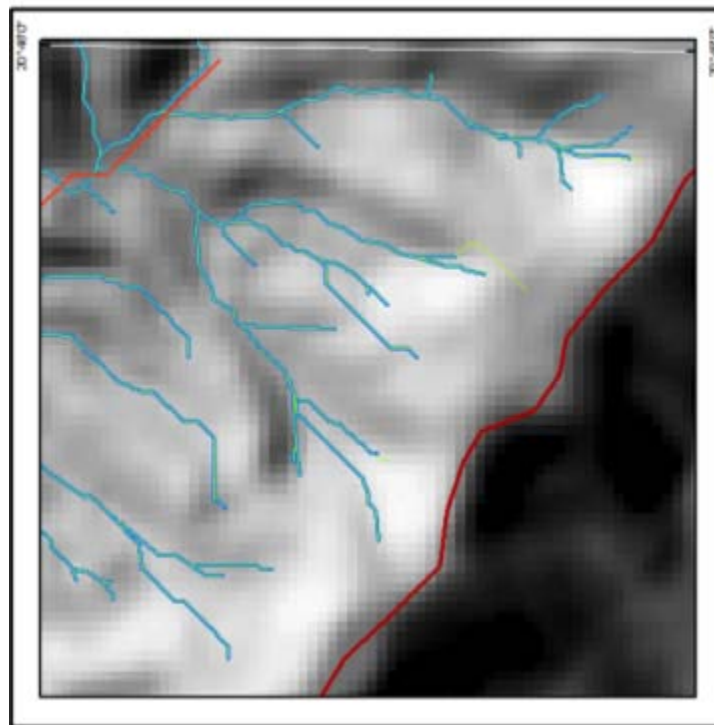


Figura 13. Acercamiento a la red de drenaje de la microcuenca La Joya.

Como se observa en la Figura 13, la diferencia entre la red de drenaje de la microcuenca La Joya generada por DetermHidro y la de "Caracterización de cuenca" es mínima, es decir, existe una gran correspondencia entre una y la otra; sin embargo, estos resultados dependen de la información base que se proporcione, es decir la construcción del MDE.

Variable	Significado	Unidades
A	Área	Km ²
P	Perímetro	Metros
Kc	Coeficiente de Compacidad	Metros
L	Longitud de Cuenca	Metros
Lc	Longitud de Cauce	Metros
Kf	Factor de forma	Metros
Orden	Orden de Corriente	
Dd	Densidad de drenaje	Km ⁻¹
Dh	Densidad de corriente	Km ⁻²
EMax	Elevación Máxima	Metros
EMed	Elevación Media	Metros
EMin	Elevación Mínima	Metros
PM	Pendiente Media	Porcentaje

Tabla 11. Significado de variables.

La Tabla 11 contiene el significado de cada una de las variables de los cálculos de las que se hace mención más adelante.

En cuanto al cálculo de los parámetros, la Tabla 12 contiene los resultados calculados manualmente, con DetermHidro y con CH-CEHIP, como se observa, los resultados entre la segunda y tercera herramienta tienen una variación muy pequeña, sin embargo en el método manual existe un rango de variación mayor; cabe mencionar que no es posible listar todos los parámetros en los tres métodos debido a que el método manual es complicado de trabajar con la elevación del terreno y resulta poco confiable, por tal motivo se usa una herramienta de SIG.

Cuenca	Método	A	P	Kc	L	Lc	Orden
Corral Blanco	Manual	32.44	25862.00	1.27	7560.00	8425.00	4
	DetermHidro	33.84	26301.38	1.27	7778.12	8225.00	4
	CH-CEHIP	33.84	26301.38	1.27	7804.42	8368.00	4
El Tepozán	Manual	144.96	60178.00	1.40	13031.00	18990.00	4
	DetermHidro	144.32	60916.96	1.43	16896.90	18706.00	5
	CH-CEHIP	144.32	60916.96	1.42	16919.56	19816.00	5
La "D"	Manual	76.20	51048.03	1.64	16426.62	20121.00	4
	DetermHidro	76.44	51284.65	1.65	16691.45	15885.00	4
	CH-CEHIP	76.44	51284.65	1.64	16145.10	20296.00	4
La Joya	Manual	15.32	16852.84	1.21	4652.36	5798.00	5
	DetermHidro	15.92	16909.93	1.20	4678.99	5967.00	5
	CH-CEHIP	15.92	16909.93	1.19	4696.35	5986.00	5
San Juan de los Durán	Manual	156.31	62248.72	1.39	17635.13	23997.00	5
	DetermHidro	158.25	62498.47	1.10	17618.96	25864.00	5
	CH-CEHIP	158.25	62498.47	1.39	17529.17	24281.00	5

Tabla 12. Resultados a partir de tres métodos.

Los parámetros mostrados en la Tabla 12 son los base para los cálculos que se complementa en la Tabla 13, sin embargo, en esta última tabla solo se muestran resultados arrojados por la herramienta CH-CEHIP (Caracterización de cuenca) y DetermHidro.

En la Tabla 13 los resultados que no varían se muestran con letras negras y los que sufren una variación se presentan en letra con un tono gris, estas variaciones pueden derivarse del ajuste del número de decimales, como es el caso del Coeficiente de Compacidad (Kc) en el cual se aprecia que el cambio se presenta en la segunda posición a la derecha después del punto decimal, a excepción de los resultados de la microcuenca San Juan de los Durán.

Cabe resaltar que en el caso de la microcuenca La Joya los resultados son más exactos; se contó con información más precisa, las curvas de nivel tienen una diferencia en la altura de 10 m, a diferencia del resto de las microcuencas donde es de 100 m.

Cuenca	Método	A	P	Kc	L	Lc	Kf	Orden	Dd	Dh	EMax	EMed	EMin	PM
Corral Blanco	DetermHidro	33.84	26301.38	1.27	7778.12	8225.00	0.56	4	1.34	2.93	2719.12	2208.16	1982.65	20.15
	CH-CEHIP	33.84	26301.38	1.27	7804.42	8368.00	0.37	4	1.71	2.60	2718.80	2208.69	1973.29	20.19
El Tepozán	DetermHidro	144.32	60916.96	1.43	16896.90	18706.00	0.51	5	1.31	2.89	2616.55	1650.89	689.28	34.79
	CH-CEHIP	144.32	60916.96	1.42	16919.56	19816.00	1.60	5	1.16	0.46	2618.43	1650.72	692.62	34.31
La "D"	DetermHidro	76.44	51284.65	1.65	16691.45	15885.00	1.65	4	1.32	2.45	2727.91	2239.74	1924.29	11.93
	CH-CEHIP	76.44	51284.65	1.64	16145.10	20296.00	0.85	4	1.47	2.21	2733.87	2237.88	1905.29	12.27
La Joya	DetermHidro	15.92	16909.93	1.20	4678.99	5967.00	0.73	5	4.04	21.73	2720.59	2424.24	2233.70	32.44
	CH-CEHIP	15.92	16909.93	1.19	4696.35	5986.00	0.18	5	4.36	21.10	2720.59	2424.24	2233.70	32.44
San Juan de los Durán	DetermHidro	158.25	62498.47	1.10	17618.96	25864.00	0.51	5	1.25	2.75	2915.99	1927.10	1169.13	33.75
	CH-CEHIP	158.25	62498.47	1.39	17529.17	24281.00	1.75	5	1.25	2.82	2917.64	1927.59	1169.61	33.79

Tabla 13. Tabla de resultados de la comparación de DermHidro y CH-CEHIP

5.3. Aplicación de la herramienta "Erosión Hídrica"

En el caso de la herramienta para estimar la erosión hídrica se contó con información desactualizada, debido a esto, los resultados no pueden mostrarse con la claridad deseada, sin embargo, trabajando la información de manera manual con la generada por la herramienta, comparamos que los resultados tienen mínimas diferencias, véase Figura 14 A y B.

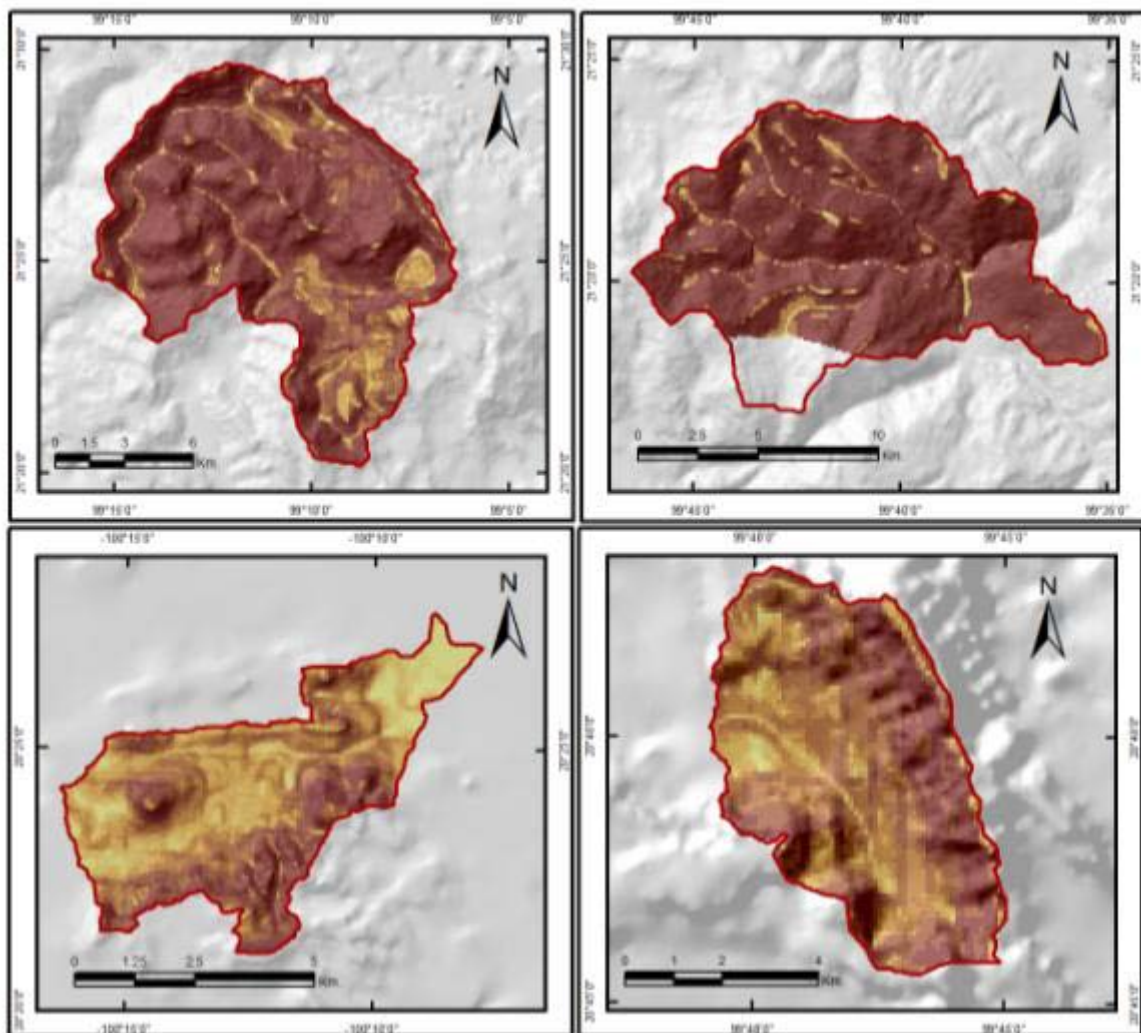


Figura 14. A) Resultados de la herramienta "Erosión Hídrica" en las microcuencas seleccionadas.

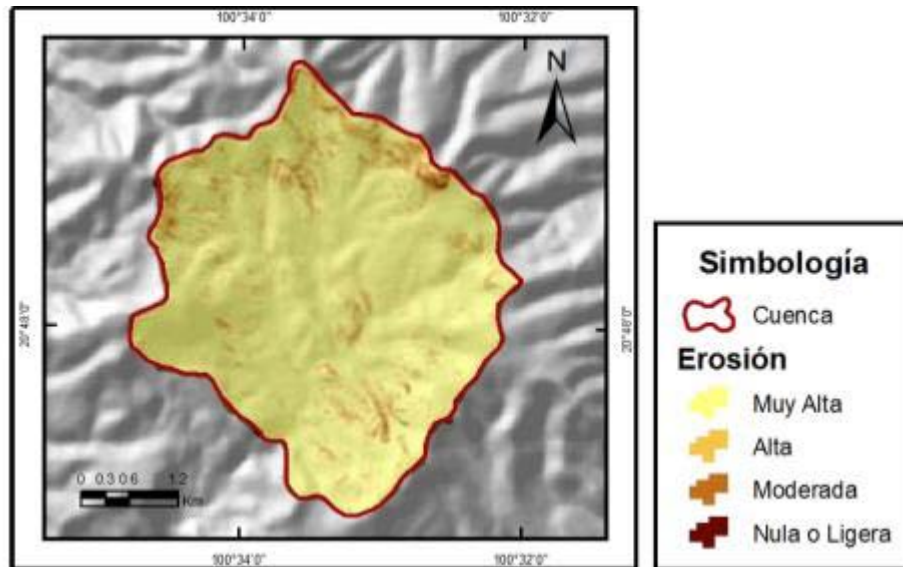


Figura 14. B) Resultados de la herramienta "Erosión Hídrica" en las microcuencas seleccionadas.

5.4. Aplicación de la herramienta "Indicadores Poblacionales" a cinco microcuencas del Estado de Querétaro

Con la finalidad de mostrar un caso de aplicación de la herramienta "Indicadores Poblacionales" y de comparar los resultados obtenidos de manera manual, se procede a la aplicación de dicha herramienta a las cinco microcuencas seleccionadas para tal objetivo, cuyo número de localidades se presenta en la Tabla 14.

Microcuenca	No. de Localidades
Corral Blanco	8
El Tepozán	9
La "D"	14
La Joya	3
San Juan de los Durán	7

Tabla 14. Número de localidades por microcuenca

La herramienta "Indicadores Poblacionales" guarda los resultados obtenidos en la tabla de datos del shapefile de la cuenca, en este caso se señaló que se calculará los seis indicadores, además de estos resultados también se agrega un

campo con el área en kilómetros cuadrados de la cuenca, así, dichos resultados se presentan en la Tabla 15 al igual que los que se obtuvieron de manera manual.

Microcuenca	Método	Tasa de Crecimiento Demográfico (%)	Densidad de Población (hab/km ²)	% de ocupantes en viviendas particulares de una cuenca			
				I _{sdys}	I _{see}	I _{sae}	I _{snh}
Corral Blanco	Herramienta	1.71	95	38.38	21.7	29.7	33
	Manual	1.71	95	38.38	21.7	29.7	33
El Tepozán	Herramienta	0.49	56	20.78	12.8	12.6	39.78
	Manual	0.49	56	20.78	12.8	12.6	39.78
La "D"	Herramienta	33.31	115	6.29	11.6	12	35
	Manual	33.31	115	6.29	11.6	12	35
La Joya	Herramienta	6.26	63	14.67	6.67	12.6	37.33
	Manual	0	18	18.86	1.48	8.33	39.7
San Juan de los Durán	Herramienta	4.8	14	26.86	30.2	17	35.43
	Manual	4.8	14	26.86	30.2	17	35.43

Tabla 15. Resultados de los parámetros (con la herramienta y manualmente)

Como se puede observar en la Tabla 15, los resultados arrojados por la herramienta son idénticos a los que se obtienen de manera manual (a excepción de la microcuenca La Joya), esto debido a que se usa la misma base de datos para sacar los cálculos.

En el caso de la microcuenca La Joya, los datos difieren de los obtenidos con la herramienta, esto debido a que en el Plan Rector de Producción y Conservación de la Microcuenca La Joya (2010) se consideraron únicamente dos localidades de las tres que se encuentra en esta, sin embargo, si se contempla la tercera localidad para el cálculo, los resultados serían los mismo.

A manera de lograr una interpretación más visible de los resultados, en cuanto a indicadores de servicio se refiere y a la tasa de crecimiento demográfico de la microcuenca, en la Figura 15 se agrupan las cinco microcuencas.

Tasa de crecimiento demográfico y Porcentaje de ocupantes en viviendas particulares de una cuenca (I_{sdys} , I_{seer} , I_{saer} , I_{snh})

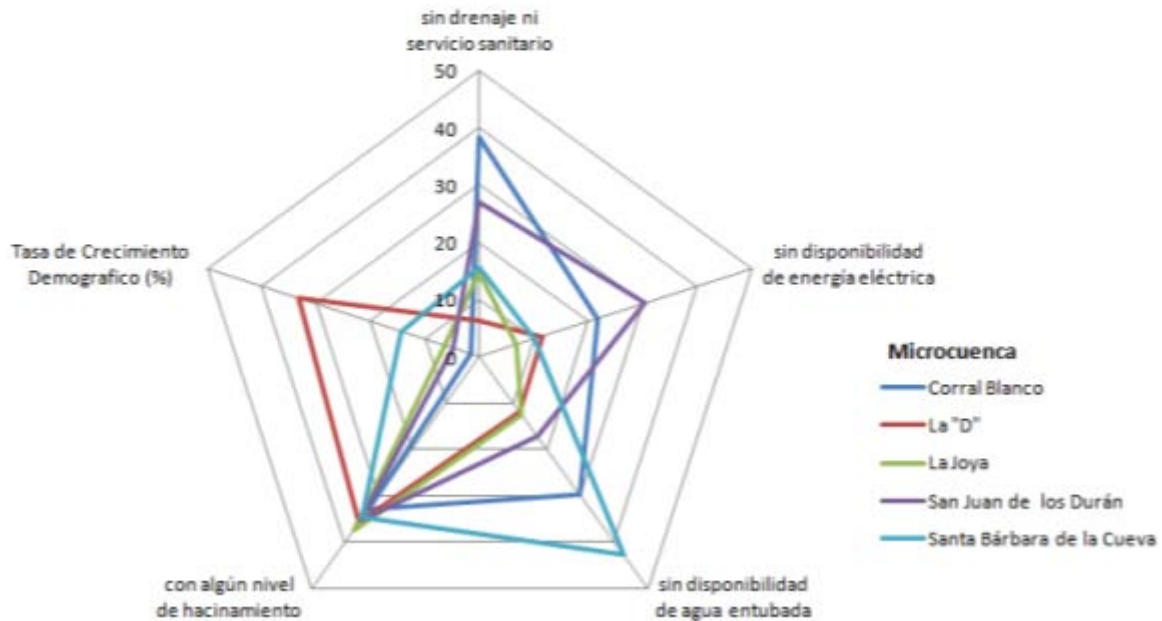


Figura 15. Gráfica de resultados de la herramienta "Indicadores Poblacionales".
Fuente: Elaboración propia

Con lo anterior se puede deducir que la microcuenca Corral Blanco cuenta con un porcentaje de ocupantes en vivienda particulares sin drenaje ni servicio sanitario, además de que las cinco microcuencas tienen un alto porcentaje de ocupantes en vivienda particulares con algún nivel de hacinamiento.

La microcuenca Santa Bárbara de la Cueva tiene el más alto porcentaje de ocupantes en vivienda particulares sin disponibilidad de agua entubada, además de ser la que más ha crecido demográficamente hablando; San Juan de los Durán tiene el más alto porcentaje sin disponibilidad de energía eléctrica; La "D" presenta un porcentaje alto en la tasa de crecimiento demográfico.

Además de los indicadores mostrados en la gráfica, también se obtiene la densidad de población a nivel de cuenca.

5.4.1. Análisis de cuencas vecinas

Una cuenta siempre está influenciada por cuencas vecinas, es decir, el comportamiento de la población afecta a sus adyacentes.

En este caso y con la herramienta Indicadores Poblacionales, se hace un análisis del comportamiento de la población, a partir de la cuenca Corral Blanco.

Las cuencas vecinas a Corral Blanco se muestran en la Figura 16 y son:

- Vizarron de Montes
- San Javier
- Cadereyta
- Rancho Nuevo

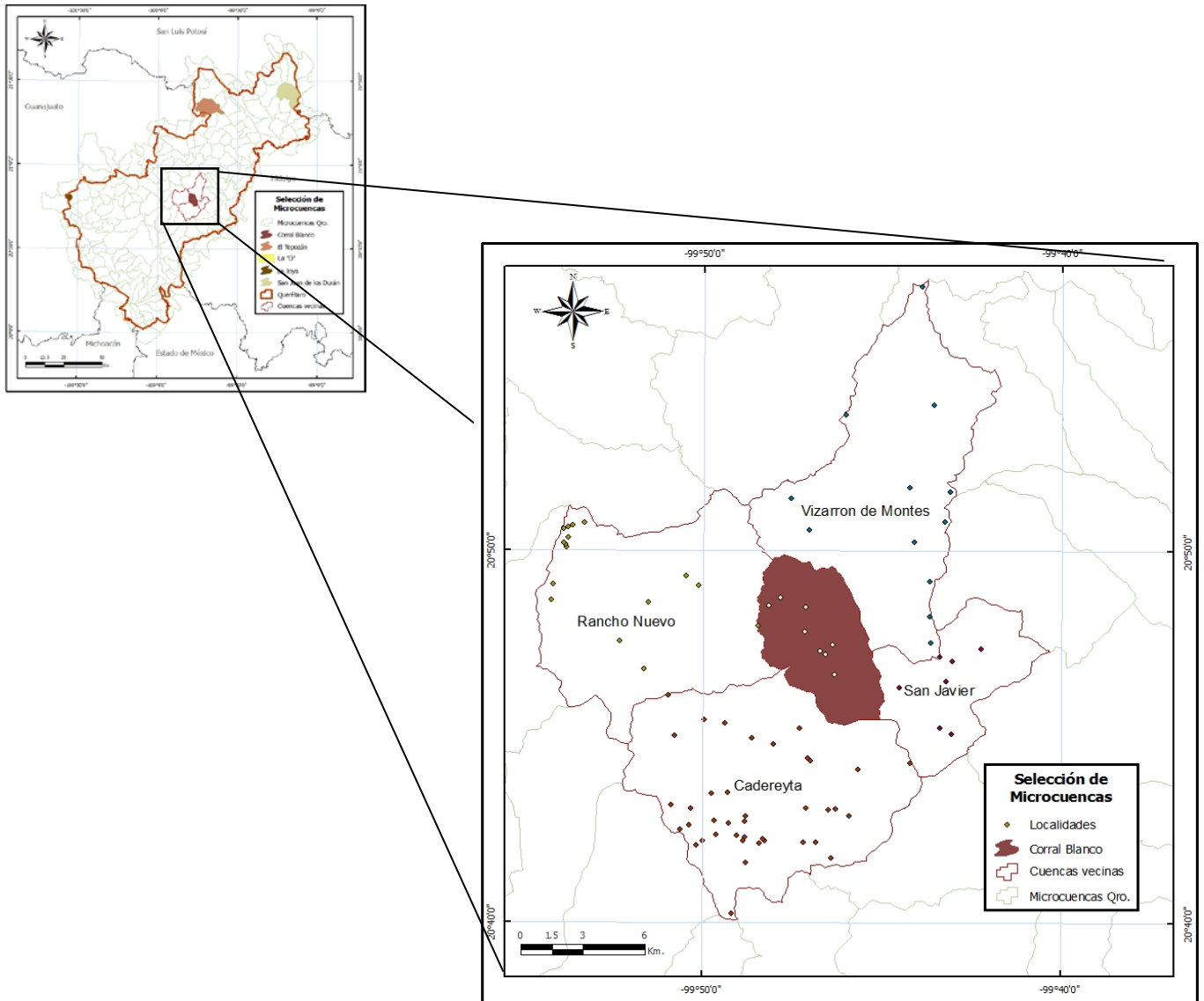


Figura 16. Cuenclas vecinas a Corral Blanco.

En la Tabla 16 se muestran los resultados arrojados por la herramienta Indicadores Poblacionales, se observa que la población se concentra en la parte suroeste, es decir en la cuenca Cadereyta, que es la más cercana a la capital del estado.

Debido a lo anterior, se deduce que las cuencas Vizarron de Montes y San Javier son las que carecen de servicio de agua entubada y que tienen un alto porcentaje de ocupantes en viviendas particulares con algún nivel de hacinamiento.

Como se observa en los resultados, la presión de las cuencas recae en Corral Blanco, pero principalmente en Cadereyta, lo cual tiene que ver principalmente por el desarrollo económico, ya que esta última es la más cercana a la capital del estado.

Microcuenca	Tasa de Crecimiento Demográfico (%)	Densidad de Población (hab/km ²)	% de ocupantes en viviendas particulares de una cuenca			
			I _{sdys}	I _{see}	I _{sae}	I _{snh}
Vizarron de Montes	92	1	14.46	14.7	46.82	33.44
San Javier	41.94	1	7.67	4.49	35.52	32.18
Corral Blanco	1.71	95	38.38	21.7	29.7	33
Cadereyta	1.08	64	17.09	8.94	26.64	38.52
Rancho Nuevo	96.7	1	15.94	4.04	32.13	35.62

Tabla 16. Análisis de cuencas vecinas.

CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

No cabe duda que el desarrollo tecnológico ha tenido un impacto muy significativo en el desarrollo de actividades del quehacer cotidiano, académico y profesional, lo que ha revolucionado las tareas de las diferentes disciplinas; en este caso, en el área de medio ambiente, la aparición de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) vino a revolucionar la manera en que se realizan los análisis espaciales, convirtiendo a éstos en un componente indispensable en todo proyecto relacionado con el manejo de recursos naturales.

ArcGIS es uno de los software's más completos y robustos del mercado, considerado como un SIG completo y por ende, unos de los más usados. En México, es posible contar con este software tanto en dependencias de gobierno (en los distintos niveles), en instituciones educativas y en particulares.

La bondad que ofrece ArcGIS a los desarrolladores de software, entre muchas otras cosas, es que permite la creación de aplicaciones de acuerdo a las necesidades de los usuarios, mediante diferentes lenguajes de programación.

El desarrollo de la barra de herramientas "CH-CEHIP" se realizó con el fin de contar con un instrumento en ArcGIS para facilitar y ahorrar tiempo en la etapa de diagnóstico en los estudios de cuencas, pero particularmente automatizar los cálculos necesarios durante dicha etapa, permitiendo que los gestores de cuencas cuenten con más tiempo en las etapas de interacción con la población.

Si bien es cierto que esta barra de herramientas está dirigida específicamente a los gestores y realizadores de estudios de cuencas, también es posible generalizar su uso, por ejemplo a estudiantes o personas con la base de conocimientos en SIG y cuencas, esto gracias a que la herramienta de diseño de una forma fácil y amigable para el usuario.

En el caso de las herramientas "Caracterización de cuenca" e "Indicadores Poblacionales" fue posible hacerlas interactivas y amigable, de tal forma que el usuario pudiera introducir información requerida para su ejecución.

Sin embargo para el caso de la herramienta de "Erosión hídrica" resulta complicado que el usuario introduzca la serie de datos requeridos durante el proceso, este es un camino largo que requiere de la valoración de distintos factores para el resultado final. Por tal motivo, la herramienta se ha limitado únicamente al Estado de Querétaro, debido a que en este caso se contó con los datos necesarios y que además fueron precargados como insumo, de suerte que el usuario solo requiere selecciona la microcuenca de su interés para obtener la estimación de la pérdida de suelo.

Cabe mencionar que ArcGIS no cuenta con una herramienta integrada relacionada con la población, por lo tanto, el caso "Indicadores Poblacionales" viene a ser un instrumento novedoso y útil en el análisis de la población en las áreas de estudio de nuestro país, gracias a que cuenta con la información de los censos poblacionales.

Particularmente, con los resultados de la herramienta "Indicadores Poblacionales" es posible crear una gráfica en forma de araña, de tal forma que sean mucho más representativos los resultados, ya que permite hacer un análisis más detallado de la situación de la población de las microcuencas.

Como muchos desarrollos, esta barra de herramientas puede mejorar su funcionamiento, así como agregar nuevos parámetros de acuerdo a las necesidades.

REFERENCIAS

- Abel, E. 2001. RAPID. Versión 4. Modelos Computarizados para Analizar las Consecuencias Socio-Económicas del Crecimiento Poblacional. Sistema The Futures Group International. Spectrum.
- AGNPS. 2001. Agricultural Non-Point Source Pollution Model. Natural Resources Conservation Service. United State Department of Agriculture. http://www.wsi.nrcs.usda.gov/products/w2q/h&h/tools_models/agnps/index.html . Revisado Marzo de 2010.
- Aparicio, F. J. 1999. Fundamentos de hidrología de superficie. Octava reimpresión. Editorial Limusa. Grupo Noriega Editores. México, D. F.
- Bauer, R.A. 1966. Social Indicators. Cambridge (Mass.): M.I.T. Press.
- Becerra, J. Ramos, I. Fuentes, J. 2009. Análisis morfométricos y descripción de cuencas en Tongoy, Región de Coquimbo. Departamento de Geología. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile.
- Campos Aranda, D.F. 1998. Procesos del ciclo hidrológico. Tercera Edición. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Facultad de Ingeniería. México.
- Chávez, R.J. (s.f.). Modelo de riesgo de erosión de suelo en cuatro micro-cuencas de la Cordillera Los Maribios, Nicaragua. Escuela Forestal y Estudios Ambientales. Universidad de Yale. New Haven, CT, Estados Unidos.
- Consejo Nacional de Población. 2005. Metodología de estimación del índice de marginación. México, D. F.

- Cortés T. H. 1991. Caracterización de la erosividad de la lluvia en México utilizando métodos multivariados. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. Montecillos. México. 168 p.
- Díaz, R. J. R. Pérez, C. D. Rodríguez, A. Y. Febles, G. J. M. 2008. Determinación de los índices de erosión de suelos aplicando análisis SIG para la localización de San Andrés en la provincia de Pinar del Río. Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y de ambiente, enero-junio, año/vol. 14, número 001. Universidad Autónoma de Chapingo.
- Domínguez, C. M. A. 2006. Conceptos Básicos de Hidrología de Cuencas. Módulo III. Chimaltenango.
- Domínguez, C. M. A. 2009. Introducción al ordenamiento de cuencas. Apuntes del Módulo I. Maestría en Gestión Integrada de Cuencas. Universidad Autónoma de Querétaro.
- CIDE. (2002). ENNViH, Encuesta Nacional sobre Niveles de Vida de los Hogares. Universidad Iberoamericana. México. <http://www.ennvih-mxfls.org> Revisada Abril de 2010.
- ERDAS Inc. 2010. <http://www.erdas.com/> . Revisado Mayo de 2010.
- ESRI. 1996. Using ArcView, GIS. USA
- ESRI. 2010. Environmental System Research Institute, Inc. <http://www.esri.com/>. Revisado Enero de 2010.
- FAO 1980. Metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos. Roma, Italia.

Faustino, J. Jiménez, F. Velásquez, S. Alpizar, F. Prins, C. 2006. Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), Turrialba, Costa Rica.

Figuroa, S., B., A. Amante O., H. G. Cortés T., J. Pimentel L., E. S. Osuna C., J. M. Rodríguez O., F. J. y F. Morales. 1991. Manual de predicción de pérdidas de suelo por erosión. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Colegio de Postgraduados-CREZAS. San Luis Potosí, México. 128 p.

FIRCO, 2005. Guía Técnica para la Elaboración de Planes Rectores de Producción y Conservación (PRPC). México.

GIS Wold. 1996. Roger Tomlinson: the father of GIS. (GIS Wold Interview). GIS Wold 9(4).

Global Foundation for Democracy and Development. 2011. Diccionario Enciclopédico Dominicano de Medio Ambiente. <http://www.dominicanaonline.org/DiccionarioMedioAmbiente/es/definicionVer.asp?id=468> Revisado Septiembre de 2011.

Goodrich, D.C., S. Scott, M. Hernandez, I.S. Burns, L. Levick, A. Cate, W. Kepner, D. Semmens, S. Miller, P. Guertin, 2006. Automated Geospatial Watershed Assessment (AGWA): A GIS-Based Hydrologic Modeling Tool for Watershed Management and Landscape Assessment. In: Proceedings, Third Federal Interagency Hydrologic Modeling Conference, Reno, NV, April 2-6, 2006.

Gutiérrez, J. E. González, J.I. 1986. Manual de clases prácticas de hidrología general. Facultad de Geografía, Universidad de la Habana, Ciudad de la Habana, Cuba.

Horn, R. V. 1993. *Statistical indicators for the economic and social sciences*. Cambridge, University Press, Hong Kong. p. 147.

INEGI. 2005. II Censo de Población y Vivienda.

INEGI. 2005. Características metodológicas y conceptuales del II Censo de Población y Vivienda.

INEGI. Densidad de población. Cuéntame... <http://cuentame.inegi.gob.mx/impresion/poblacion/densidad.asp>. Revisado noviembre, 2010.

INEGI. 2010. Forma y tamaño de la Tierra. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México. <http://mapserver.inegi.gob.mx/geografia/espanol/normatividad/infgeodesia/tierra> Revisado en Noviembre de 2010.

Jenness, J.; Dooley, J.; Aguilar-Manjarrez, J.; Riva, C. 2007. African Water Resource Database. GIS-based tools for inland aquatic resource management. 1. Concepts and application case studies. CIFA Technical Paper. No. 33/1. Rome, FAO.

López, J. 2005. Sistemas de Información Geográfica en estudios de geomorfología ambiental y recursos naturales. Colección Seminarios. Facultad de Filosofía y Letras. Universidad Nacional Autónoma de México.

Maguire, D. J., Goodchild, M. F. y Rhind D. W. 1991. Geographical Information System: Principles, Geographical Information System: Applications. United Kingdom. Longman. 2 vols.

Mesa O., Poveda G., Vélez, L.I., Barco J., Botero B., Cuartas, A., Hoyos, C., Mantilla, R., Mejía, J.F., Montoya, M. 1999. HIDRO-SIG: Una herramienta

para la estimación de balances hidrológicos de Colombia. VII Conferencia Iberoamericana sobre Sistemas de Información Geográfica, Mérida, Venezuela. 20p.

Milliarium Aureum, S. L. 2001, 2004. Ingeniería Civil y Medio Ambiente. <http://www.miliarium.com/paginas/soft/softwarehidrologiahidraulica.asp> . Revisado Diciembre 20009.

Montes, M. A. L. Domínguez C. M. A. Ventura R. E. 2001. Metodología para la estimación del riesgo de erosión hídrica en cuencas hidrográficas utilizando un sig. Maestría en Hidráulica. Facultad de Ingeniería-División del Posgrado, Universidad Autónoma de Querétaro.

NCGIA. 1990. *National Center for Geographic Information and Analysis*. <http://www.ncgia.ucsb.edu>. Revisado Abril, 2011.

Ordóñez, C., Martínez-Alegría, R. 2003. Sistemas de Información Geográfica. Aplicaciones prácticas con Idrisi32 al análisis de riego natural y problemáticas medioambientales. Ra-Ma Editorial. Madrid España.

Organización de las Naciones Unidas (ONU). *Integrated and coordinated implementation and follow-up of major*. United Nations conferences and summits. Nueva York, Estados Unidos de América. www.un.org/documents/ecosoc/docs/1999/e1999-11. Revisado Noviembre, 2010.

Parra, R.H., Marulanda, J.S., Escobar, J.F. 1997. Sistemas de Información Geográfica. Base de la gestión ambiental. Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín. Colombia.

Pierson, F. 2000. Erosión models: use and misuse on rangelands. En: Rangelands desertification. Kluwer Academic Publishers. Norwell, MA., USA., pp. 67-76.

POPULUS. Simulación de dinámica poblacional. <http://www.efn.uncor.edu/departamentos/divbioeco/ecol/paqueteinformatico.htm> . Revisado Enero 2010.

Rabuñal D., J. R. 2010. Laboratorio de Ingeniería Civil y Computación Evolutiva. Departamento de Comunicación y Tecnologías de la Información. Universidad de la Coruña. España.

Rodríguez, M. F. Florentino, A. Gallardo, J. García, R. 2004. Sistema de información geográfica en la evaluación hídrica en Badajoz-España aplicando la metodología USLE.

Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). Fideicomiso de Riesgo Compartido (FIRCO). 2005. Guía técnica para la elaboración de planes rectores de producción y conservación (PRPC). México, D. F.

Valtierra, J.G. 2007. Desarrollo de una herramienta computacional para el diagnóstico hidrológico de cuencas. Tesis Maestría en Gestión Integrada de Cuencas. Universidad Autónoma de Querétaro. Querétaro.

Vargas, G., Becerra, J. Ramos, I. Fuentes, J. 2009. Análisis morfométrico y descripción de cuencas en Tongoy, Región de Coquimbo. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile.

Vivo, Jorge A. 1980. Geografía Física. Editorial Herrera S. A. México, D. F. p. 44-45.

Wischmeier, W. H. and D. D. Smith. 1978. Predicting rainfall erosion losses-A guide to conservation planning. USDA. Handbook No. 537. 58 p.

Wolf, A.T., Kerstein, S., Macomber, M.F. 2003. Conflict and Cooperation within International River Basins: The Importance of Institutional Capacity. <http://www.transboundarywaters.orst.edu/publications/> Revisado en septiembre de 2011.

ANEXOS

A1. MANUAL DE INSTALACIÓN

El presente manual tiene como propósito principal guiar en la instalación de la barra de herramientas CH-CEHIP en el software ArcGIS, en específico en ArcMap.

La guía contiene los siguientes puntos:

- Introducción
- Requisitos de instalación
- Insumos de partida
- Instalación de la barra de herramientas
- Requisitos para adaptar a otro estado de la República Mexicana
- Contacto

Introducción

Este documento tiene como objeto ser una guía explicativa del proceso de instalación de la barra de herramientas CH-CEHIP desarrollada para el software ArcGIS versión 9.x.

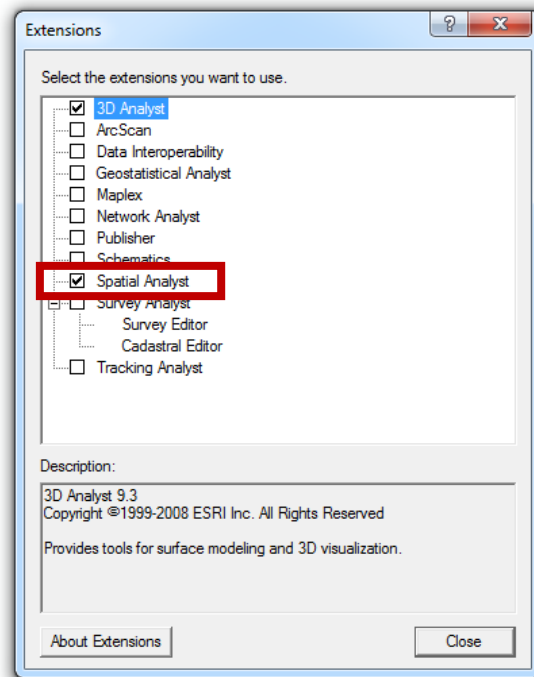
Además de la instalación de la barra de herramientas, este documento contiene una descripción de la información precargada junto con las herramientas, de tal forma que se pueda adaptar a otros estados de la República Mexicana.

Requisitos de instalación

Los requisitos previos a la instalación de la barra de herramientas CH-CEHIP, para garantizar un correcto funcionamiento posterior son los siguientes:

- Instalación previa del software ArcGIS (ArcMap Desktop) versión 9.x, el cual debe cumplir con los requisitos mínimos del equipo de cómputo al momento de la instalación.

- Instalación de la extensión Spatial Analyst, la cual ofrece una amplia gama de modelos espaciales y herramientas de análisis, necesaria durante la ejecución de las herramientas de CH-CEHIP. Para corroborar que se cuenta con dicha extensión, en el menú principal de ArcMap, seleccionar *Tools* y posteriormente *Extensions*, aparece el siguiente cuadro de diálogo, ahí se puede ver si se cuenta con la extensión y si ésta está activa.



Insumos de partida

Con el propósito de evitar que el usuario tenga que proporcionar toda la información necesaria que sirve de base para el funcionamiento de las herramientas, ésta fue proporcionada por la propia universidad y se ha precargado de suerte que se cuenta con lo siguiente:

- Shapefile de las microcuencas del Estado de Querétaro
- Shapefile de uso de suelo y vegetación del Estado de Querétaro
- Shapefile de edafología del Estado de Querétaro
- Raster de las isoyetas del Estado de Querétaro
- Shapefile de las localidades de la República Mexicana

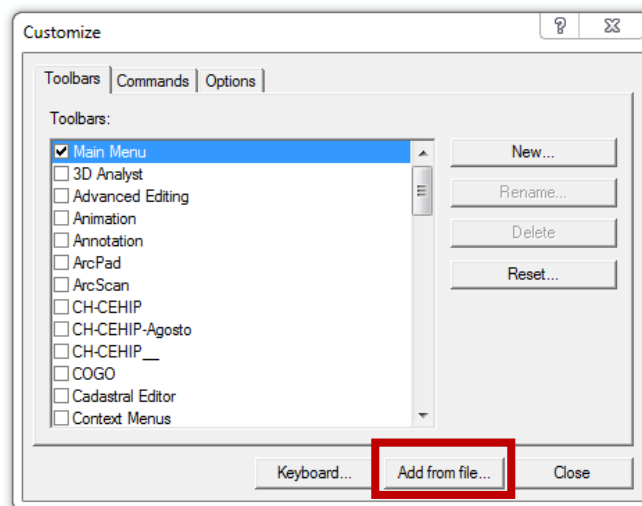
Instalación de la barra de herramientas

Para instalar la barra de herramientas es necesario contar con derechos de Administrador en el equipo de cómputo y seguir los siguientes pasos:

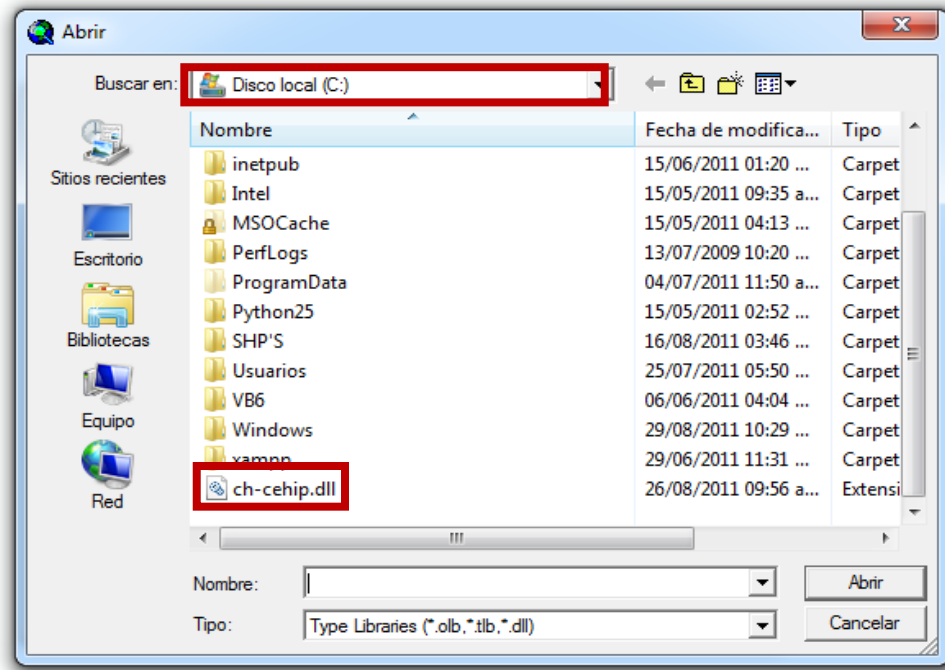
Ejecutar el archivo *ch_cheip.exe* que se encuentra en el disco de instalación. Este archivo copiará los elementos necesarios y la información base a la unidad principal de la maquina (C:/CH_CEHIP).

En la unidad c:/ se encontrará un archivo llamado *ch-cehip.dll*, este es una librería que sirve para la ejecución de la barra de herramientas.

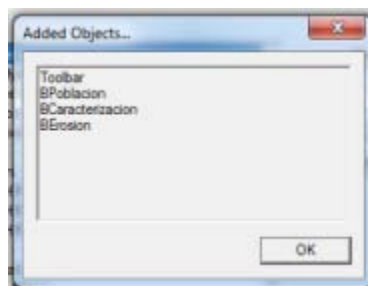
En la ventana de ArcMap seleccionar del menú principal *Tools*, posteriormente *Customize...* y aparecerá el cuadro de diálogo siguiente:



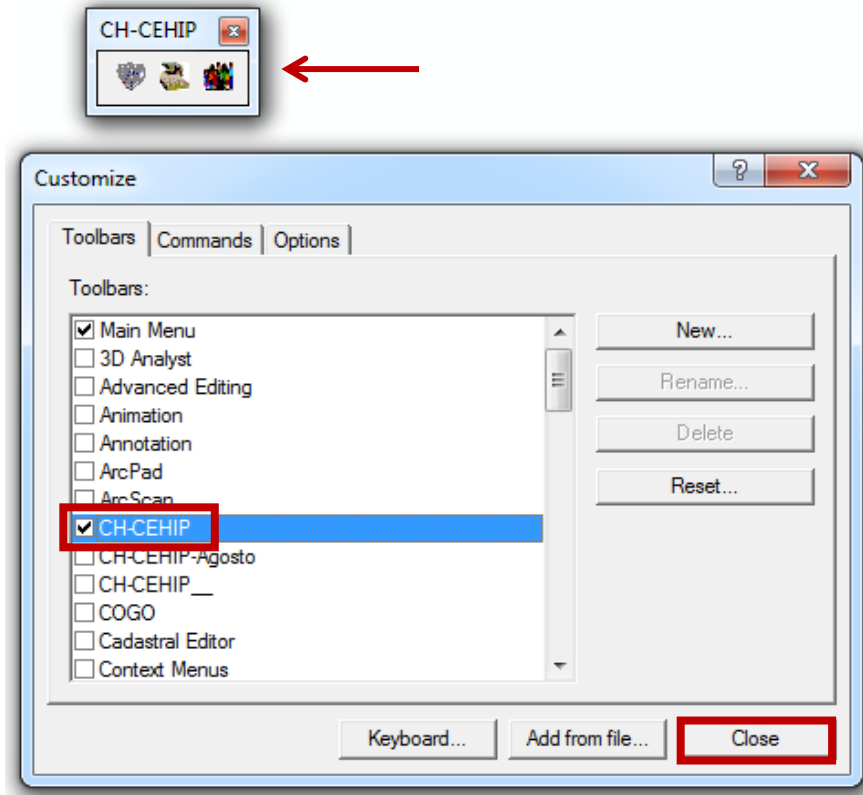
Presionar el botón *Add from file...*, aparece el siguiente cuadro de diálogo:



Asegurarse de que se encuentra en el disco local *c:/* y que en este se encuentre el archivo *ch-cehip.dll*, posteriormente presionar el botón *Abrir*. Aparece el siguiente cuadro de diálogo indicando los elementos que se agregarán.



Presionar el botón *OK* y activar la barra de herramientas, inmediatamente esta aparecerá en la pantalla, lo único que resta es presionar el botón *Close* y empezar a usar las herramientas (para el funcionamiento de dichas herramientas ver Manual de Usuario en el anexo A2).



Requisitos para adaptar a otro estado de la República Mexicana

Las tres herramientas contenidas en CH-CEHIP están pensadas para realizar estudios de diagnóstico de cuencas, sin embargo, para demostrar su aplicación las herramientas están enfocadas al caso particular del Estado de Querétaro, esto es debido a que fue el lugar donde se realizó este trabajo de investigación, además de que para este estado se contó con la información necesaria para demostrar su aplicación.

Sin embargo, es posible realizar una adaptación a cualquier estado de la República Mexicana, siempre y cuando se cumpla con los requisitos al pie de la letra, esto debido a que durante la ejecución de las herramientas se hace referencia a nombres de archivos y campos específicos.

A continuación se describen los nombres de archivos y campos requeridos en cada una de las herramientas:

Las tres herramientas de CH-CEHIP tienen como base el shapefile llamado *microcuencas.shp*, el cual debe contener en la tabla de atributos los campos:

- **EDO_LOC_PP**. Este campo contiene el nombre del estado en el cual se encuentra la microcuenca.
- **MPIO_LOC_P**. Este campo se refiere al municipio donde se encuentra la microcuenca.
- **NOMBRE_MIC**. Este campo contiene el nombre de la microcuenca.

En el caso de la herramienta Erosión Hídrica es necesario contar con los archivos:

- *Isoyetas*. Es un archivo en formato raster que se obtiene a partir de la información de las estaciones meteorológicas.
- *cnivel.shp*. Este archivo es necesario para crear el grid de pendientes requerido en la herramienta y debe contener los siguientes campos:
 - **ELEVATION**. Es el campo que contiene la elevación de las cotas.
- *edafologia.shp*. Este archivo permite conocer el tipo de suelo del área de estudio y debe contener los campos:
 - **TIPO_SUE**. Es el tipo de suelo del terreno
- *usv.shp*. Este archivo se refiere al uso de suelo y vegetación y debe contener los campos:
 - **FACTOR_C**. Se obtiene a partir del uso de suelo y vegetación, este factor se obtiene mediante el propuest por Figueroa et al. (1991)

La herramienta Indicadores Poblacionales trabaja con la siguiente información base:

- *LocalidadesMexico.shp*. Es el shapefile que contiene las localidades de la República Mexicana, este archivo debe contener los siguientes campos en la tabla de atributos:
 - **HAB_2005**. Se refiere al número de habitantes en el censo de 2005
 - **POB_TOT**. Es el número de habitantes en el censo de 2010

- **SDYE.** Es el porcentaje de ocupante en viviendas particulares sin drenaje ni servicio sanitario.
- **SEE.** Es el porcentaje de ocupante en viviendas particulares sin energía eléctrica.
- **SAGUA.** Es el porcentaje de ocupante en viviendas particulares sin agua entubada.
- **HACINA.** Es el porcentaje de ocupante en viviendas particulares con algún nivel de hacinamiento.

Conforme se cuente con nuevos censos de población y vivienda, los campos se pueden actualizar con la nueva información.

Todos los archivos antes mencionados deben tener el sistema de proyección de coordenadas WGS 1984 (ver parámetros en el apartado Correspondencia espacial del Capítulo IV) y estar contenido en la carpeta que se creó en la unidad c:/ al momento de la instalación, dichos archivos sustituirán a los existentes.

Contacto

En caso de tener algún comentario, pregunta o sugerencia acerca de la barra de herramientas CH-CEHIP favor de contactarse al correo que aparece en la parte de abajo.

Si tiene dificultades para instalar o ejecutar las herramientas, lea con atención el manual de usuario e instalación. Estos contienen las instrucciones precisas para su funcionamiento, además de ver el video tutorial. Si después de revisar lo anterior sigue teniendo dificultades, no dude en contactarse al correo que aparece al final, la respuesta a sus inquietudes y comentarios se hará tan pronto como sea posible. Todos los mensajes serán contestados.

Ing. Elda Barbosa Briones

elda.bb@gmail.com

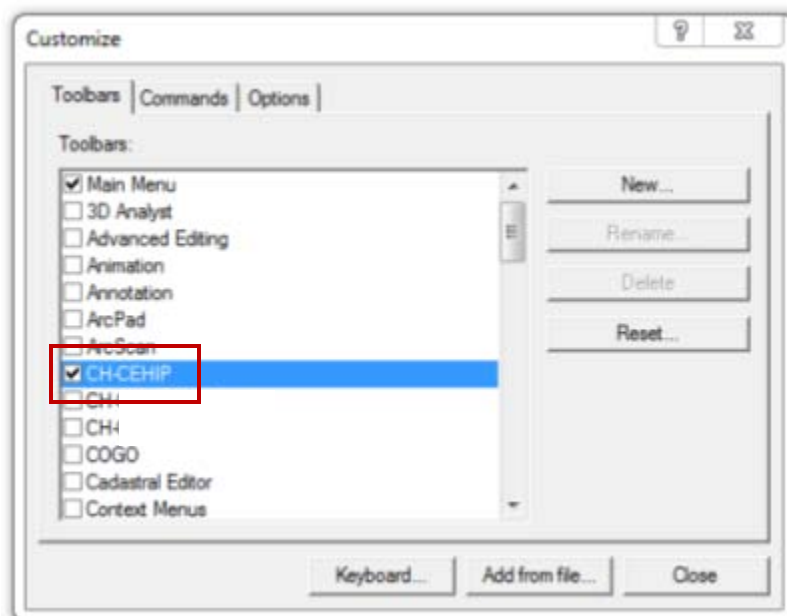
A2. MANUAL DE USUARIO

Este manual de usuario para la barra de herramientas "CH-CEHIP" ha sido elaborado con la intención de ofrecer una guía necesaria para su uso; está dirigido a aquellas personas interesadas en conocer el funcionamiento de las tres herramientas contenidas en esta.

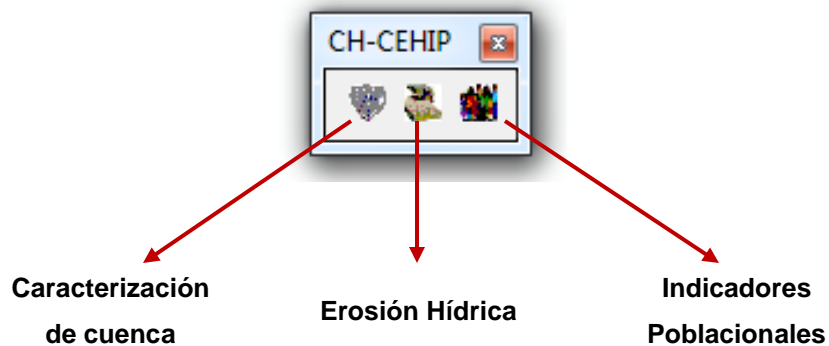
Para hacer uso de las herramientas es necesario hacer una instalación previa (ver A1), una vez instalada la barra de herramientas "CH-CEHIP", está se mantendrá en ArcMap, en caso de que no aparezca en la ventana principal cuando se inicia, es necesario activarla.

Activar barra de herramientas "CH-CEHIP"

En el menú principal seleccionar *Tools*, posteriormente *Customize*, aparece la siguiente ventana, seleccionar la pestaña *Toolbars*, donde se activara la barra de herramientas:



Una vez marcada, la barra aparecerá en la pantalla, la cual contiene tres herramientas que se muestran en la imagen.

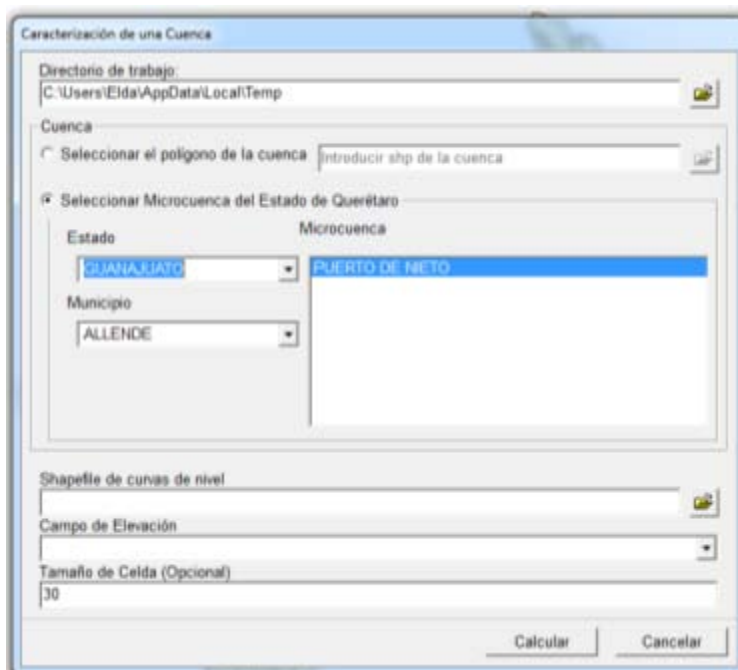


La barra de herramientas de CH-CEHIP está lista para usarse.

Herramienta Caracterización de cuenca

Esta herramienta obtiene los parámetros físicos de una cuenca, para su uso:

- Dar click en *Caracterización de cuenca* de la barra de herramientas CH-CEHIP (primer icono). Se cargará el shapefile de las microcuencas del Estado de Querétaro y aparece el siguiente cuadro de diálogo:



Directorio de trabajo. Se refiere a la carpeta de disco donde se guardará la información que genera la herramienta, inicialmente aparece la carpeta temporal del usuario actual de la máquina, esta se puede cambiar; para ello, presionar el botón de abrir para cambiar la carpeta de trabajo.

Cuenca. En esta sección se define el polígono de la cuenca, para esto, se puede hacer mediante cualquiera de las opciones siguientes:

- *Seleccionar el polígono de la cuenca.* El usuario introduce un shapefile que contiene el polígono de la cual se quiere obtener los parámetros, dicho shapefile debe ser de tipo polígono, de lo contrario aparecerá un mensaje donde pide que se introduzca el shapefile de tipo polígono, o
- *Seleccionar Microcuenca del Estado de Querétaro.* La herramienta trae precargado el shapefile de las microcuencas del Estado de Querétaro, por lo que el usuario solo debe seleccionar la microcuenca de su interés, para esto se deben asignar tres parámetros:
 - **Estado:** Debido a que los límites de una cuenca no son los mismos que los de la división política; en el campo Estado se listan los estados colindantes con Querétaro. El usuario selecciona el estado del cual le interesa calcular los parámetros.
 - **Municipio.** Una vez que se selecciona el estado, el siguiente paso es seleccionar el municipio donde se encuentra la microcuenca.
 - **Microcuenca.** En este campo se listan las microcuencas pertenecientes al estado y municipio seleccionado, basta con seleccionar la cuenca de interés y esta se guardará como shapefile dentro del directorio de trabajo, además de agregarse a la vista.

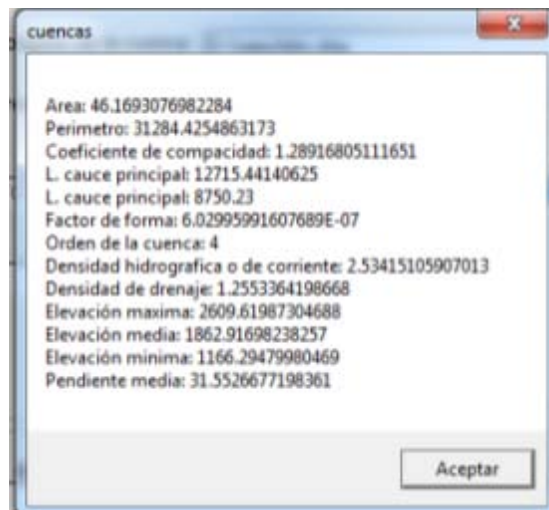
Shapefile de curvas de nivel. En este campo se introduce un shapefile de tipo línea, de lo contrario aparecerá el siguiente mensaje:



Campo de Elevación. En este campo se listan los atributos del shapefile de curvas de nivel del campo anterior. Seleccionar el campo correspondiente a la elevación.

Tamaño de Celda (Opcional). Este campo se refiere al tamaño de pixel correspondiente al MDE, este campo es opcional y dependerá de la calidad de la información de las curvas de nivel, por defecto su valor es de 30.

Calcular. Una vez proporcionada la información requerida dar click en el botón *Calcular*, inmediatamente se desactivan los dos botones de la parte inferior derecha del cuadro de diálogo (Calcular y Cancelar), al finalizar los cálculos se muestra un segundo cuadro de diálogo con los resultados.



Los resultados que aparecen en el cuadro de diálogo anterior se guardan en la tabla de atributos del shapefile del polígono de la microcuenca. Además de esto, se agrega la información generada por la herramienta, la cual consiste en el

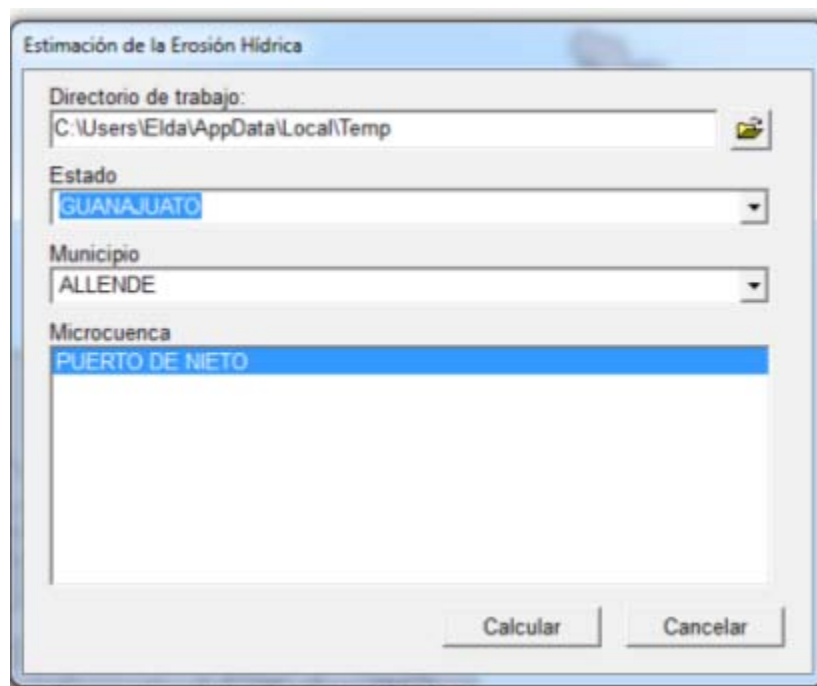
MDE (Modelo Digital de Elevación) de la microcuenca en formato raster y la red de drenaje de la misma, como shapefile de tipo líneas, la información antes mencionada se guarda en el directorio de trabajo.

Cancelar. Si el usuario no desea realizar ningún cálculo, presionar click en el botón Cancelar, se elimina de la vista el shapefile de las microcuencas del Estado de Querétaro y el cuadro de diálogo.

Herramienta Erosión Hídrica

Esta herramienta obtiene la erosión potencial de las microcuencas del Estado de Querétaro, la cual funciona de la siguiente manera:

- Dar click en *Erosión Hídrica* de la barra de herramientas CH-CEHIP (segundo icono). Se carga el shapefile de las microcuencas del Estado de Querétaro y aparece el siguiente cuadro de diálogo:



Directorio de trabajo. Se refiere a la carpeta de disco donde se guardara la información que genera la herramienta, inicialmente aparece la carpeta temporal del usuario actual de la máquina, esta se puede cambia; para ello, presionar el botón de abrir para cambiar la carpeta de trabajo.

La herramienta trae precargado el shapefile de las microcuencas del Estado de Querétaro, por lo que el usuario solo debe seleccionar la microcuenca de su interés, para esto se deben asignar tres parámetros:

- **Estado:** Debido a que los límites de una cuenca no son los mismos que los de la división política; en el campo Estado se listan los estados colindantes con Querétaro. El usuario selecciona el estado del cual le interesa calcular los parámetros.
- **Municipio.** Una vez que se selecciona el estado, el siguiente paso es seleccionar el municipio donde se encuentra la microcuenca.
- **Microcuenca.** En este campo se listan las microcuencas pertenecientes al estado y municipio seleccionado, basta con seleccionar la cuenca de interés y esta se guardara como shapefile dentro del directorio de trabajo, además de agregarse a la vista.

Calcular. Una vez proporcionada la información requerida dar click en el botón *Calcular*, inmediatamente se desactivan los dos botones de la parte inferior derecha del cuadro de diálogo (*Calcular* y *Cancelar*), al finalizar dichos cálculos, se carga el archivo tipo raster guardado en el directorio de trabajo, en cual contiene un campo con la clasificación del tipo de erosión hídrica presentada en la microcuenca.

Cancelar. Si el usuario no desea realizar ningún cálculo, presionar click en el botón *Cancelar*, se elimina de la vista el shapefile de las microcuencas del Estado de Querétaro y el cuadro de diálogo.

Herramienta Indicadores Poblacionales

Esta herramienta obtiene los indicadores poblacionales seleccionados de una cuenca, para su uso:

- Dar click en *Indicadores Poblacionales* de la barra de herramientas CH-CEHIP (tercer icono). Se carga el shapefile de las microcuenas del Estado de Querétaro y aparece el siguiente cuadro de diálogo:

Indicadores Poblacionales

Directorio de trabajo: C:\Users\Elda\AppData\Local\Temp

Seleccionar el polígono de la cuenca [Introducir shp de la cuenca]

Seleccionar microcuenca

Microcuenas del Estado de Querétaro

Estado	Microcuenca
GUANAJUATO	PUERTO DE NIETO

Municipio: ALLENDE

Densidad de Población Demográfico

Tasa de Crecimiento

% de ocupantes en viviendas particulares sin drenaje

% de ocupantes en viviendas particulares sin disponibilidad de energía eléctrica

% de ocupantes en viviendas particulares sin disponibilidad de agua entubada

% de ocupantes en viviendas particulares con algún nivel de hacinamiento

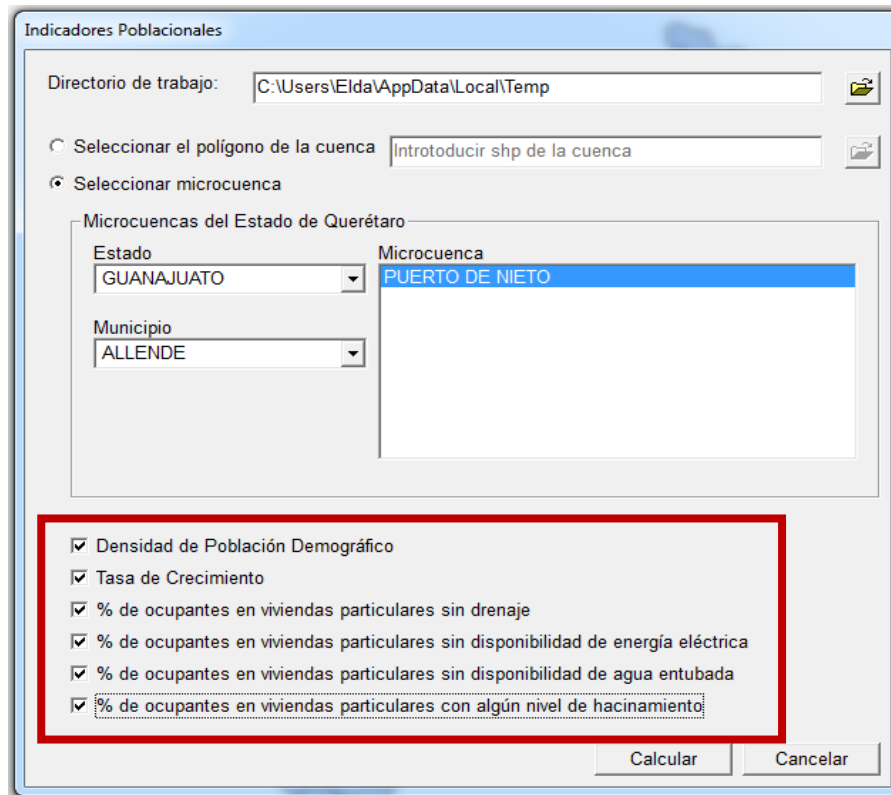
Calcular Cancelar

Directorio de trabajo. Se refiere a la carpeta de disco donde se guardara la información que genera la herramienta, inicialmente aparece la carpeta temporal del usuario actual de la máquina, esta se puede cambia; para ello, presionar el botón de abrir para cambiar la carpeta de trabajo.

Cuenca. En esta sección se define el polígono de la cuenca, para esto, se puede hacer mediante cualquiera de las opciones siguientes:

- *Seleccionar el polígono de la cuenca.* El usuario introduce un shapefile que contiene el polígono de la cual se quiere obtener los parámetros, dicho shapefile debe ser de tipo polígono, de lo contrario aparecerá un mensaje donde pide que se introduzca el shapefile de tipo polígono, o
- *Seleccionar Microcuenca del Estado de Querétaro.* La herramienta trae precargado el shapefile de las microcuencas del Estado de Querétaro, por lo que el usuario solo debe seleccionar la microcuenca de su interés, para esto se deben asignar tres parámetros:
 - **Estado:** Debido a que los límites de una cuenca no son los mismos que los de la división política; en el campo Estado se listan los estados colindantes con Querétaro. El usuario selecciona el estado del cual le interesa calcular los parámetros.
 - **Municipio.** Una vez que se selecciona el estado, el siguiente paso es seleccionar el municipio donde se encuentra la microcuenca.
 - **Microcuenca.** En este campo se listan las microcuencas pertenecientes al estado y municipio seleccionado, basta con seleccionar la cuenca de interés y esta se guardara como shapefile dentro del directorio de trabajo, además de agregarse a la vista.

Posteriormente se seleccionan los indicadores que se desea calcular, para esto dar click en el cuadro correspondiente, como se muestra en la figura siguiente:



Calcular. Una vez proporcionada la información requerida dar click en el botón *Calcular*, inmediatamente se desactivan los dos botones de la parte inferior derecha del cuadro de diálogo (*Calcular* y *Cancelar*).

Los resultados de los indicadores seleccionados se guardan en la tabla de atributos del shapefile del polígono de la cuenca. Además de esto se agrega la información generada por la herramienta, la cual consiste en el shapefile de puntos con las localidades que se encuentran dentro de la cuenca, la información antes mencionada se guarda en el directorio de trabajo.

Cancelar. Si el usuario no desea realizar ningún cálculo, presionar click en el botón *Cancelar*, se elimina de la vista el shapefile de las microcuencas del Estado de Querétaro y el cuadro de diálogo.

Para mayor información referirse al video tutorial contenido en el disco de instalación.