

Ordenamiento Urbano y Territorial visto desde el manejo de cuencas a través de un Sistema de Información Geográfica (SIG) en la Cuenca El Ahogado, Jalisco

Juan Luis Caro Becerra*

Recepción: 16 de abril de 2013

Aceptación: 18 de septiembre de 2013

*Universidad Politécnica de la Zona Metropolitana de Guadalajara, Jalisco, México.

Correo electrónico: juancarobecerra@gmail.com

Se agradecen los comentarios de los árbitros de la revista.

Resumen. Se identifican en la Cuenca El Ahogado los puntos vulnerables en áreas susceptibles a inundaciones por lluvias, ya que todos los escurrimientos fluyen hacia la parte baja, ocasionadas por factores pluviales como la intensidad en periodos cortos o precipitaciones máximas en 24 horas. Después se integró una base de datos de lluvias máximas en 24 horas de por lo menos 20 años, ya que puntualiza el régimen pluvial de la región, con el objetivo de predecir el riesgo por precipitaciones intensas sobre lo cual se basa este trabajo. Se complementa con un análisis prospectivo.

Palabras clave: riesgo, cuenca, inundaciones, precipitaciones, análisis prospectivo.

Urban and Territorial Planning Using a Watershed Management Approach and Geographic Information Systems for El Ahogado Basin in the State of Jalisco, Mexico

Abstract. In the basin El Ahogado there are areas prone to flooding from torrential rains of high intensity, since all the runoff flows into the lower part of the basin. This study has as its purpose the identification of points vulnerable to floods caused by factors such as rain: intensities that are presented in short periods of time as well as maximum rainfall in 24 hours. With the foregoing is a full database of maximum rainfall in 24 hours over at least 20 years that spells out the rainfall of the region, with the purpose of predicting the risk of intense precipitation; this work is complemented by a prospective analysis.

Key words: risk, basin, floods, rainfall, prospective analysis.

Introducción

La Cuenca El Ahogado se localiza en la parte sureste del estado de Jalisco (20° 38' N y 103° 15' W), donde se extiende junto al río Santiago (a una altura media de 1 550 msnm) con una extensión de 520 km². Abarca porciones de cinco de los ocho municipios de la Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG), las cuales se dividen del siguiente modo: Tlajomulco de Zúñiga (48% del territorio), Tlaquepaque (21%), El Salto (13%), Zapopan (13%) y Tonalá (5%), además de una de menos de 30 has del municipio de Guadalajara (Mendoza

Pérez y Venegas Herrera, 2003). En cuanto a la población, de acuerdo con el último censo de 2010 había alrededor de 986 000 habitantes, con un total de 213 200 viviendas; esto indica un crecimiento superior a 22% en los últimos cinco años respecto a la década de los noventa, aunque varía considerablemente de municipio a municipio.

La Cuenca El Ahogado se divide en 13 subcuencas de acuerdo con su importancia y magnitud: Arroyo de En medio, Las Juntas, El Maleno, El Cuervo, El Mulato, El Guayabo, La Teja, Arroyo Seco, La Rusia, El Cuervo de Abajo, y tres más de la presa El Ahogado: directa, propia y salida de presas.

Esta cuenca se ha convertido en una zona crítica que al experimentar un importante proceso de asentamientos de manufactura ha generado corredores de comercio y servicios industriales, aunado al considerable aumento de la población. El crecimiento ha sido destacado en los últimos 30 años, ya que en 1970 la población alcanzaba 50 mil habitantes, mientras que en 2000 alcanzaba cerca de 500 mil (INEGI, 2010). Cabe señalar que en la primera década de este siglo la población tuvo un incremento de 250% respecto a 1990; de hecho se tienen ya urbanizados en forma definitiva 117 km² pero existe la tendencia a que la densidad de población aumente en pocos años y ocupe una superficie de alrededor de 250 km², según las autoridades que están vigentes en los cinco municipios que conforman dicha cuenca (Mendoza Pérez y Venegas Herrera, 2003).

La Cuenca El Ahogado, asentada en un medio de origen volcánico tipo extrusivo, presenta variaciones climáticas que influyen en la presencia de numerosas comunidades vegetales dispuestas en tipos de suelo contrastantes. Como resultado, la biodiversidad es extensa y ofrece numerosos servicios ambientales a la población. Después de siglos de ocupación y manejo de los recursos naturales, son evidentes las alteraciones de sus condiciones originales; sin embargo, aún quedan remanentes de cauces cuyo estudio es indispensable en la búsqueda de su rehabilitación ambiental (Chávez Hernández, 2009). La superficie que ocupa el uso habitacional es de 15%, pero el autorizado en los planes parciales le da la posibilidad de aumentar a más de 28%, a lo cual se suman los desarrollos urbanos y reservas tanto de industria como de comercio, tal es el caso del llamado Valle del Silicio Mexicano, formado por empresas dedicadas a la industria electrónica que se asentaron en la parte del sur. Además de las reservas naturales, la situación de los asentamientos indica a mediano plazo que 50% del área estará por urbanizarse. Actualmente el área total forestada es de 62%, pero podría reducirse hasta 43% de acuerdo con los planes de desarrollo urbanos que se ejecuten (INEGI, 2010). Aunado a esto, la intensa actividad agropecuaria repercute en una pérdida constante de cobertura vegetal y degradación de suelos que produce daños irreversibles.

Sin duda, uno de los mayores problemas ambientales es el cambio en los patrones naturales de flujo del agua ocasionado por las obras hidráulicas hechas en las zonas de cabecera y captación, es decir, en la cuenca alta y media. Las presas, “verdaderos íconos del desarrollo económico y del progreso científico moderno” (Toledo y Bozada, 2002), fragmentan la conectividad de los ecosistemas fluviales e interrumpen el flujo. Provocan también el aislamiento de poblaciones e interrumpen las migraciones de otras especies y modifica

la calidad del agua “presa aguas abajo” en relación con los cambios de temperatura, cantidad de nutrientes, turbidez, gases disueltos, concentración de metales pesados y minerales (Mc Cully, 2004). El represamiento de los cuerpos de agua, el crecimiento de los asentamientos urbanos y el desarrollo de corredores industriales sin una infraestructura con capacidad de saneamiento básico ha originado que muchos de los ríos de la cuenca se hayan convertido en canales conductores de aguas negras o residuales con un drástico impacto acumulativo aguas abajo de la cuenca.

Esta situación presenta dos enfoques que explican gran parte de la crisis hídrica que se vive en este lugar: por un lado, el impulso al modelo de desarrollo hidráulico, con requerimientos intensivos de tecnología e inversión de capital para la satisfacción de las demandas de agua de los diferentes sectores productivos y las grandes ciudades circundantes y, por otro, la persistencia de las instituciones gubernamentales de querer solucionar un problema ecosistémico manipulando solo uno de sus elementos: el agua (Cotler, 2006).

Por ello, resulta apremiante utilizar un enfoque integral del manejo de cuencas para entender las interrelaciones entre los recursos naturales (relieve-suelo-agua-vegetación), así como las formas en las cuales la población se organiza para beneficiarse de los recursos y reducir su impacto en la cantidad, calidad y disponibilidad del agua que dé la posibilidad de evaluar y de explicar las externalidades de los diferentes usos del suelo (Cotler, 2006). Al igual que Boehm y Sandoval (1999), podemos afirmar que a pesar de que existen múltiples estudios técnicos sobre esta cuenca, el conocimiento que se tiene de ella permanece fragmentado.

En este contexto, llevar a cabo una gestión integrada de los recursos naturales representa una herramienta fundamental para planear el desarrollo sustentable de la región que busque maximizar los beneficios en un proceso de negociación constante con los grupos de interés o representantes de los diferentes sectores de la cuenca para que posibilite llegar a acuerdos coordinados que aseguren la puesta en marcha y continuidad de acciones que mantengan o reviertan el deterioro ambiental de la Cuenca El Ahogado (González Salazar *et al.*, 2008).

La perspectiva del manejo de cuencas también ha cambiado: hoy no sólo se refiere al conocimiento, análisis y protección de los recursos hídricos, sino también la capacidad de los suelos, la vegetación, el relieve, el impacto de la población, la infraestructura civil para la producción sustentable de bienes y servicios; de esta forma, las cuencas se convierten en unidades lógicas para la planeación y la gestión de los recursos naturales. De ahí nace la necesidad de desarrollar el proyecto “Integrar la información geográfica

digital para el manejo integral de cuencas, caso de la Cuenca El Ahogado”.

El objetivo, entonces, es obtener información geográfica estructurada que facilite el análisis y la evaluación de la problemática hidrológica en la Cuenca El Ahogado, a partir de los datos almacenados en forma digital en un Sistema de Información Geográfica (SIG).

Para llevar a cabo el desarrollo se planearon cuatro etapas:

- a) Definición de los objetivos del proyecto
- b) Creación de la Base de Datos del SIG
- c) Desarrollo del análisis geográfico
- d) Presentación de los resultados

Otra de las funciones del SIG es que determinará las zonas de alto riesgo a las inundaciones y facilitará a las autoridades correspondientes elaborar una planeación urbana y territorial adecuada, así como de las obras hidráulicas necesarias para que no se ponga en peligro tanto los bienes materiales como las vidas humanas en la parte baja de la cuenca; con el propósito, además, de integrar al SIG por medio de capas el tema de las poblaciones en los municipios para saber con certeza la densidad de población en cada subcuenca y después incorporar lo que determinan los planes de desarrollo urbano y uso de suelo vigentes de cada municipio, que ayudará a visualizar con claridad y detalle lo ya consolidado en materia de uso de suelo y lo que falta para los próximos años (Congralton y Grenn, 1992).

Por estas razones, es factible la construcción de un SIG, ya que es posible hacer cruces de información por medio de capas –hidrología, planes de uso de suelo, habitantes y viviendas– con el fin de permitir una precisión total de la capacidad de los cauces, arroyos, presas y vasos de almacenamiento con el fin de evitar problemas de conducción de las aguas pluviales, que significa un enorme desperdicio de recursos naturales debido a la falta de obras hidráulicas aguas arriba, incluso de determinar el número de personas y viviendas que pudiera resultar afectado en distintos puntos geográficos en el presente y el futuro.

1. Desarrollo del marco teórico

La situación actual del país presenta varios factores limitantes para el desarrollo sustentable, de la cual se detecta la contaminación, la degradación ambiental, la pérdida de conocimientos y las tradiciones locales, el aumento de la vulnerabilidad de las poblaciones y el uso de tecnologías ineficientes (Dourojeanni *et al.*, 2002).

De igual manera, por la falta de planeación integral del desarrollo, se ha generado una gran desigualdad regional caracterizada por una economía central con pocas oportu-

nidades de empleo y servicios en la comunidad, además de una economía periférica. Esta realidad en parte ha sido causada, por una falta de visión integral y dinámica de las interacciones que se dan entre la sociedad, la economía, la tecnología y los recursos naturales de una región que definen la dinámica particular de las comunidades (Priego Santander y Cotler, 2004). De este modo, se requiere un enfoque integral donde el territorio sea analizado como un sistema complejo formado por tres grandes sistemas: natural, social y productivo, cuyas interacciones son resultado de una dinámica interna influida por agentes externos de carácter nacional e internacional.

El concepto de *riesgo* se refiere a la probabilidad de que ocurra un evento perjudicial que provoque daño a las personas o a sus bienes, así como a los elementos del medio natural. Respecto a las precipitaciones, los valores extremos son un factor de riesgo que se traduce en grandes torrentes que provocan inundaciones en determinadas zonas y épocas del año. Por lo tanto, la prevención de los riesgos climatológicos se efectúa al observar la información meteorológica correspondiente a largos periodos que permite distinguir cuáles pueden ser considerados como habituales (próximos a los valores medios normales) y aquellos que por su marcada diferencia se vinculan con el riesgo (Marín Stillman, 2008).

La relación probabilística entre la intensidad de la lluvia, su duración y frecuencia es presentada usualmente en forma de gráficas. Estas representaciones son referidas como curvas de intensidad-duración-periodo de retorno, resultado de unir los puntos que especifican su intensidad en intervalos de diferente duración y también en distintos periodos de retorno.

La dinámica de crecimiento socioeconómico que caracteriza a la cuenca en las últimas décadas, la enfrenta a severos problemas relacionados con la degradación y el deterioro del medioambiente por el cambio de uso de suelo y la explotación de sus recursos naturales. Hoy en día más que una oportunidad, es una limitante para el desarrollo (Cotler, 2006).

Actualmente, la Cuenca El Ahogado se caracteriza por sus deficiencias y por estar contaminada, la cual se mantiene bajo una fuerte presión sobre sus recursos hídricos y naturales (Mc Culligh, 2006). La disponibilidad del agua superficial en la cuenca está declarada como nula y gran parte de los acuíferos que ahí se encuentran están altamente sobreexplotados (Gleason Espíndola, 2012). Los altos niveles de contaminación de origen agrícola, industrial y urbano que se registran en la zona afectan el aprovechamiento del agua y representa un problema

de salud pública tanto para los habitantes como para la supervivencia de la flora y fauna.

En Jalisco la Comisión Estatal de Agua y Saneamiento (CEAS) (2010) ha hecho estudios hidrológicos en la Cuenca El Ahogado con el fin de mostrar características hidrológicas particulares y propias de la región,¹ de los cuales resalta la gran presión a la que está expuesto el recurso hídrico por un cambio de uso de suelo, donde se evidencia la importancia de monitorearla para entender su comportamiento y así facilitar la toma de decisiones del manejo.

Uno de los problemas más serios que se verificaron, y que se debe tener presente, es que en los desarrollos urbanos de la cuenca la topografía tiene una pendiente casi nula, alrededor de 60% de la superficie. De hecho, de los trabajos que realizó la propia CEAS en 2012 en el colector que va del Fraccionamiento Eucaliptos hasta la descarga de la planta de aguas residuales San Miguel (paralela a la carretera San Miguel-Cajititlan) presenta una pendiente del orden de 0.4%, cuando la mínima debería ser de 2%, por lo que el caudal de aguas residuales permanece prácticamente estancado durante mucho tiempo. Caso contrario sucede en las partes altas (al norte y oeste), donde el agua que ahí se capta baja rápidamente a la planicie y la satura durante periodos prolongados, por tanto debe estudiarse con más detalle y mostrar la necesidad de una plataforma que profundice el análisis.

El SIG en la Cuenca El Ahogado brindará datos tanto de cuerpos de agua contaminados, como de índices de contaminación a la que están expuestas las descargas de aguas residuales principalmente en zonas donde hay mayor expansión, que es el sur, y que abarca los municipios de Tlajomulco de Zúñiga y Tlaquepaque. También favorecerá a los municipios para que generen su propia información respecto al comportamiento hidrológico de todas las presas, vasos, cauces y arroyos de su territorio, de tal manera que estarán en posibilidad de construir obras de prevención.

Cabe señalar que este proyecto fue concebido con el propósito de determinar el comportamiento hidrológico de la infraestructura para conducir las aguas pluviales en la cuenca. En otras palabras, es una herramienta que posibilita modelar con diferentes escenarios de lluvia hasta dónde se tendrá la capacidad útil para el buen funcionamiento de las presas, vasos y arroyos existentes y en dónde no con la finalidad de reconocer los puntos vulnerables a las inundaciones que afectarían la vida y el patrimonio de la población.

2. Metodología

2.1 Creación de la base de datos del SIG

El desarrollo de la integración de la base de datos se efectuó con el programa ArcInfo GIS 10.0 ESRI 2010 (SIG, 2013), a partir de lo cual se logró un diseño completo donde se planearon los modelos conceptual, lógico y físico que fueron de gran ayuda en el desarrollo de las aplicaciones.

Sobre la base de esta metodología se obtuvieron algunos resultados (hidrología, cobertura vegetal, densidades de población, etc.) que muestran los problemas respecto a las escasas de agua debido a los abatimientos del acuífero de los niveles estáticos, de modo que se utilizó un modelado espacial y vistas tridimensionales con el programa ArcView 10.0 ESRI 2010 (SIG, 2013), del cual se obtuvieron mapas claros y presentaciones visuales que reflejaron el grado de sobreexplotación.

En este estudio la metodología propone herramientas que permitan integrar una cartografía de eventos históricos para conocer en dónde se han registrado riesgos por inundaciones, además de identificar, describir y cuantificar zonas que resulten afectadas en el futuro.

Este método radica en la generación de imágenes de las variables ambientales susceptibles de ser representadas espacialmente con el auxilio de procedimientos de interpolación espacial (Valdivia Ornelas *et al.*, 2005), las cuales son:

- a) Climáticas: precipitación, evaporación y temperatura.
- b) Hidrológicas: escurrimiento superficial.
- c) Relieve: análisis de curvas de nivel, orientación de laderas, pendiente topográfica.

Para determinar las posibles relaciones entre los atributos ambientales y la disponibilidad de agua con la distribución de la vegetación se elaboraron operaciones aritméticas y algebraicas a partir de imágenes (figura 1), que en este caso son LandSat de varias temporadas.

Se encuentra que los factores que favorecen la retención del agua para los procesos biológicos son la presencia de pendientes topográficas suaves, valores altos en atributos puntuales de relieve (presencia de huecos, hondonadas y pasos), en atributos de superficie de relieve (almacenamientos). El clima, en este caso, ejerce gran influencia en las modificaciones que sufre el relieve terrestre en la conformación de la naturaleza del suelo y en la distribución espacial de los seres vivos.

Las manifestaciones del clima están ligadas a la vida diaria de todos los seres humanos, de modo que actividades como la agricultura, la ganadería, la pesca, la industria, el comercio o el transporte y tiene una fuerte relación con las características del terreno, en especial el relieve, que influye en la vegetación o la fauna. Asimismo, influye en la salud,

1. Estudio hidrológico y disponibilidad de agua superficial en la Cuenca El Ahogado, 2008. Adecuación.

la recreación, la confortabilidad, el vestir y la vivienda (Chávez Hernández, 2009).

La climatología describe de forma estadística el comportamiento medio de las principales variables atmosféricas como temperatura, precipitación, humedad y presión atmosférica en un determinado lugar. La información básica para el análisis climatológico consiste en registros diarios obtenidos de las estaciones climatológicas que se encuentran ubicados a lo largo del territorio nacional.

Para la elaboración del análisis climatológico se emplearon las series de datos de cinco estaciones que se localizan en la Cuenca El Ahogado, cuya extensión oscila en un periodo de 15 a 20 años, y que en su conjunto pretende dar representatividad climática. La información es proporcionada por la base de datos Extractor Rápido de Información Climatológica (ERIC) del Instituto Mexicano de la Tecnología del Agua. Con latitud norte y sur, las estaciones son: Tlajomulco (20° 4', 103° 35'), El Salto (20° 3', 103° 10'), Zapopan (19° 43', 103° 32'), Guadalajara (20° 41', 103° 23'), Tlaquepaque (20° 58', 103° 37') (IMTA, SEMARNAT 2000, 2009). Para esto se integraron las series climáticas de datos y se obtuvieron representativos como la temperatura, precipitación máxima en 24 hrs y número de días con lluvia. En este aspecto, es necesario señalar que los

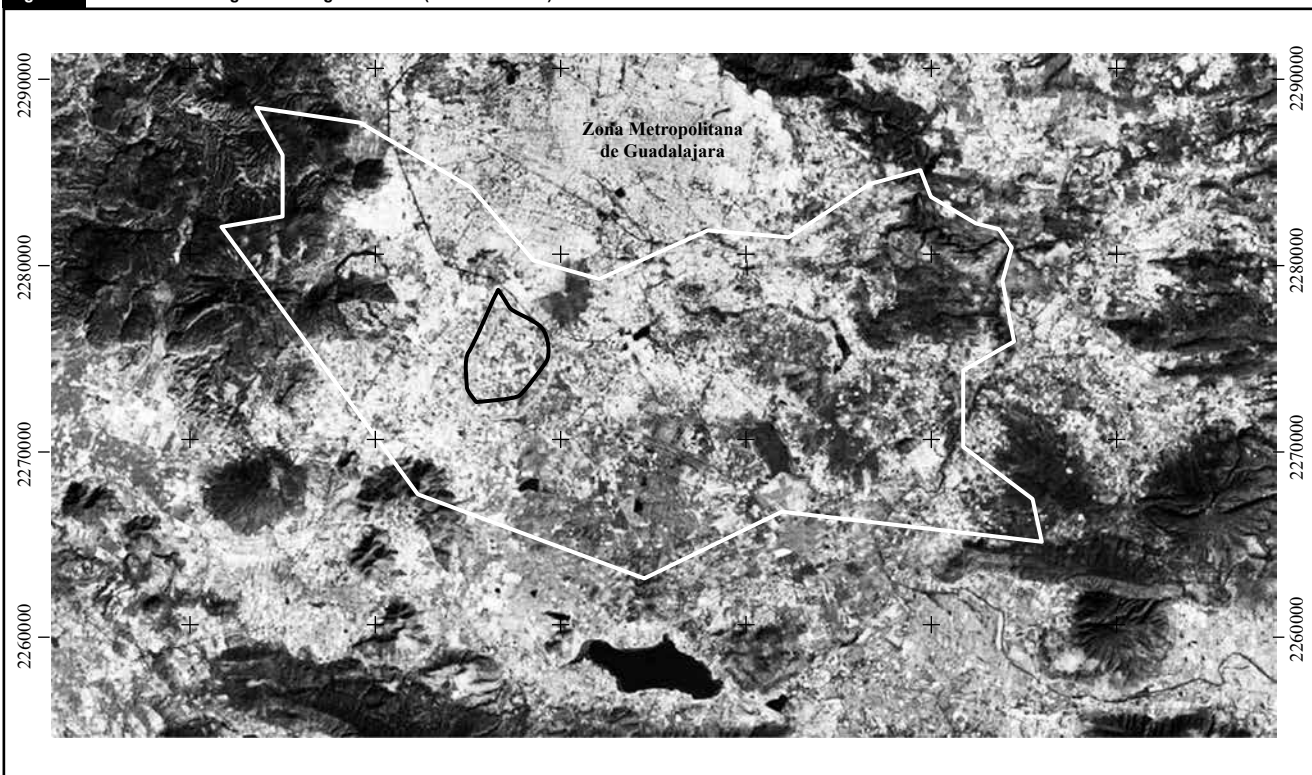
análisis y las estimaciones son estadísticos, por lo tanto, los resultados son una aproximación a la realidad.

En general, el clima de la Cuenca El Ahogado no es uniforme en toda su extensión. Aparicio Mijares (2007) describe con detalle los tipos de clima para cada uno de los municipios que la conforman. La variabilidad climatológica encontrada responde a circulaciones atmosféricas que provienen de diferentes direcciones y las temporadas del año.

La información climatológica se establece como el punto de partida para analizar su variabilidad o para entender los patrones de distribución de los ecosistemas que caracterizan a la cuenca y el potencial de desarrollo para las actividades productivas (ganadería o agricultura). Hoy en día, este tipo de información es cada vez más valiosa, ya que es fundamental para prevenir y mitigar posibles afectaciones de eventos hidrometeorológicos extremos: inundaciones y sequías.

Según Mosiño (1974), la temporada de lluvias en la mayor parte del país se presentan durante el verano. Al respecto, las zonas del país que las presentan son aquellas que tienen porcentajes de lluvia invernal menores del 10% de la anual debido a que durante esta estación dominan los vientos alisios que introducen una gran cantidad de humedad que recogen al pasar por las aguas cálidas del Golfo de México.

Figura 1. La Cuenca El Ahogado en imagen LandSat (Escala 1: 50000).



Nota: la línea blanca indica el límite de la cuenca y la línea negra muestra la zona más baja y vulnerable a las inundaciones.
Fuente: GEOEX, 2012.

3. Resultados

La lluvia está definida por tres variables: intensidad, duración de la tormenta y el periodo de retorno, la intensidad es la lámina o profundidad total de la lluvia durante una tormenta. De esta forma, la altura de lámina de agua caída en el lugar de la tormenta incorpora la cantidad de lluvia precipitada y la duración del evento. Mientras que el periodo de retorno, es la frecuencia, o intervalo de recurrencia, es decir el número de años promedio en el cual el evento puede ser igualado o excedido cuando menos una vez. En el entendido, que el riesgo es mayor, cuando menor es el periodo de retorno o de recurrencia (Jiménez, 2006) (tabla 1).

4. Delimitación del parteaguas

El límite de la cuenca de estudio fue extraído de la carta topográfica F13D66 Escala 1:50000 para contar con un mejor resultado, así como para contrarrestar los resultados conseguidos de la imagen Landsat. En la figura A1 del anexo se muestra el resultado con base en la superficie altitudinal, la línea punteada indica el parteaguas realizado

5. Características fisiográficas de la cuenca

5. 1. Superficie

La superficie es considerada el parámetro fisiográfico más importante. Se extrae por medio de planímetros, o a partir de la delimitación de mapas topográficos, y se calcula través del uso de sistemas CAD (por sus siglas en inglés), el valor resultante fue de 181.16 km².

5. 2. Parteaguas

La longitud del parteaguas de la cuenca también fue obtenida por el uso del software AutoCad y el resultado fue de 62.044 km, donde se ilustra una perspectiva sombreada de relieve de las faldas del cerro La primavera.

5. 3. Forma

La forma de la cuenca es la característica del hidrograma de la descarga de un río. Para determinarla se utilizó el coeficiente de compacidad o Índice de Gravelius (*Kc*), que se define como la relación entre el parteaguas y la circunferencia de un círculo que tenga la misma superficie.

$$Kc = \frac{0.2820 P}{\sqrt{Ac}}$$

Donde *P* y *Ac* son el parteaguas y la superficie respectivamente. Cuando una cuenca posee el coeficiente igual a 1 significa que es perfectamente circular; cuando *Kc* = 1.128 se trata de una muy alargada. Para la subcuenca Presa El Ahogado, *Kc* = 1.27 indica que en este estudio tiende a ser ligeramente alargada, es decir, a mayor sea el coeficiente de compacidad, mayor será su tiempo de concentración.

5. 3. 1. Relación de circularidad (*Rci*)

Rci es el cociente entre el área de la cuenca y la de un círculo cuya circunferencia es equivalente al parteaguas.

$$Rci = \frac{4\pi Ac}{Ac^2}$$

El valor es de 1 para una cuenca circular y para una cuadrada es de 0.785. Para la subcuenca Presa El Ahogado el *Rci* = 0.5913, que corrobora que la cuenca tiende a ser un cuadrado.

5. 3. 2. Relación de elongación (*Re*)

La relación de elongación fue definida por Schumm como el cociente entre el diámetro (*D*) de un círculo con la misma superficie de la cuenca y su longitud máxima (*Lm*), que es definida como la más grande dimensión a lo largo de una línea recta desde la salida hasta el límite extremo del parteaguas, paralela al río principal (Diaz Delgado *et al.*, 1999)

$$Re = \frac{D}{Lm} = 1.1284 \frac{\sqrt{Ac}}{Lm} = 1.1284 \frac{\sqrt{181.6}}{21.76} = 0.6988$$

Cuando el valor de *Re* se acerca a la unidad significa que es una cuenca totalmente plana; en cambio, con relieve pronunciado se encuentra entre 0.60 y 0.80.

5. 3. 3. Rectángulo equivalente

Se compara la influencia de las características de la cuenca sobre el escurrimiento. La característica más

Tabla 1. Intensidad, duración de la tormenta y periodos de retorno en la Cuenca El Ahogado (mm).

Periodo de retorno en años	Intensidad de lluvia por minuto (mm)					
	5'	15'	30'	45'	60'	120'
2	11.3	20.8	28.2	33.2	36.8	47.5
5	15.0	27.4	37.2	43.8	48.8	62.7
10	17.7	32.4	44.0	51.8	57.8	74.2
25	21.3	39.1	53.0	62.4	69.6	89.4
50	24.1	44.1	59.8	70.4	78.6	100.9
100	26.8	49.1	66.7	78.4	87.5	112.4

Fuente: Caro Becerra *et al.*, 2012.

importante del rectángulo equivalente es que se tiene igual distribución de alturas que la curva hipsométrica original de la cuenca (Monsalve Sáenz, 1995). Los lados del rectángulo están definidos por la siguiente ecuación:

$$L, l = \frac{Kc\sqrt{Ac}}{1.12} \left[1 \pm \sqrt{1 - \frac{1.12^2}{Kc^2}} \right]$$

Donde L es el lado mayor y l es el lado menor. Para el caso de la subcuenca Presa El Ahogado: $L = 22.18 \text{ km}^2$ y $l = 6.42 \text{ km}^2$. El rectángulo se muestra en la figura 2.

5. 3. 4. Curva hipsométrica

Otra forma de representar el rectángulo equivalente es mediante la representación gráfica del relieve de una cuenca, donde por medio de esta curva se representa la variación de los niveles topográficos con referencia al nivel medio del mar, dicha variación puede ser indicado en las abscisas el porcentaje del área acumulada y en la ordenadas se relaciona el valor de la cota topográfica, para construir la curva hipsométrica se determinó planimetrando las áreas entre cada una de las curvas de nivel como se muestra en la gráfica 1. Análogamente se presentan los resultados para la presa El Ahogado y se calcula de la siguiente manera, como se indica en la tabla 2.

5. 3. 5. Pendiente equivalente constante

Es uno de los indicadores más importantes del grado de respuesta de una cuenca a una tormenta (Aparicio Mijares, 2007). Para conseguir la pendiente media del cauce principal se aplica la Fórmula de Taylor y Schwarz, con la cual se obtiene una pendiente promedio del cauce principal, similar a la de un canal uniforme que tenga igual longitud y tiempo de viaje (Campos Aranda, 1998). Se define por la siguiente ecuación:

$$S = \left(\frac{\sum_{i=1}^n \frac{li}{\sqrt{Si}}}{\sum_{i=1}^n \frac{li}{\sqrt{Si}}} \right)^2$$

La pendiente media de la subcuenca Presa El Ahogado es $0.002598 \approx 2.598\%$ respectivamente.

Por otra parte, la ventaja de obtener los parámetros fisiográficos mediante un SIG es la cuantificación del tipo de cobertura vegetal, así como del relieve topográfico de la cuenca como se muestra en la tabla 3.

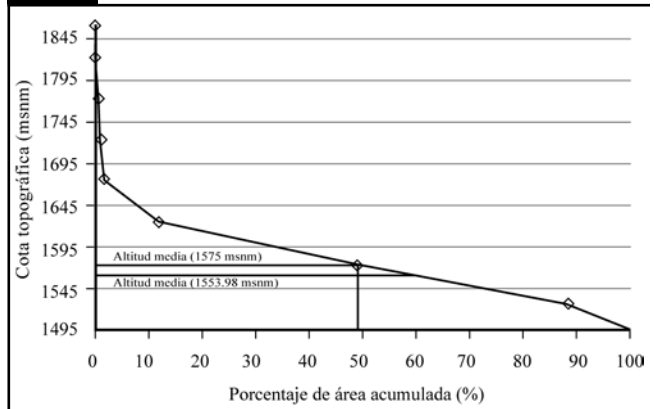
$$S = \left(\frac{\sum_{i=1}^n \frac{li}{\sqrt{Si}}}{\sum_{i=1}^n \frac{li}{\sqrt{Si}}} \right)^2 = \left(\frac{0.69013}{427007.05} \right)^2 = 0.002598$$

Figura 2. Rectángulo equivalente de la subcuenca Presa El Ahogado.



Fuente: Caro Becerra et al., 2012.

Gráfica 1. Curva hipsométrica de la subcuenca Presa El Ahogado.



Fuente: Caro Becerra et al., 2012.

Tabla 2. Curva hipsométrica Presa El Ahogado.

Cotas intervalo de clase (msnm)	Cota media del intervalo (msnm)	Área (km²)	Área acumulada (km²)	Porcentaje de área (km²)	Porcentaje acumulado de área (%)	Columna (2) × Columna (3)	Longitudes acumuladas del rectángulo equivalente (km²)
1900-1850	1875	0.0174	0.0174	0.0096	0.0175	32.7837	0.0027
1850-1800	1825	0.2744	0.2918	0.1514	0.1690	500.7977	0.0454
1800-1750	1775	0.6440	0.9359	0.3555	0.5245	1 143.2134	0.1455
1750-1700	1725	0.9827	1.9187	0.5424	1.0669	1 695.3272	0.2984
1700-1650	1625	1.7146	3.6333	0.9464	2.0134	2 871.9831	0.5652
1650-1600	1575	17.8365	21.4699	9.8454	11.8588	28 984.431	3.3399
1600-1550	1525	67.7682	89.2381	37.4066	49.2654	106 734.916	13.8820
1550-1500	1495	71.3633	160.6014	39.3910	88.6564	108 829.057	24.9835
1500-1490	—	20.5824	181.1838	11.3610	100.0175	30 770.6983	28.1826
		181.16			281 530.423		

Fuente: Caro Becerra et al., 2012.

6. Hidrología

6. 1. El Balance Hidrológico de la Cuenca El Ahogado

El objetivo del balance hídrico es identificar los meses del año en que existe déficit o excedente de agua en el suelo. Por lo tanto, conocer el balance de humedad en el suelo es importante en actividades como la agricultura, estudios hidrológicos, conservación de suelos, drenaje, riesgos, repoblación forestal, mantenimiento de parques y jardines.

El ciclo hidrológico del agua constituye el movimiento general del agua: ascendente por evaporación y descendente por precipitación, después en forma de escurrimiento superficial y subterráneo.

La escorrentía subterránea es mucho más lenta que la superficial y esta lentitud le confiere al ciclo cierta característica: que los ríos continúen con caudal mucho tiempo después de la últimas precipitaciones. Las aguas subterráneas no son más que una de las fases o etapas del ciclo del agua y su desconocimiento puede provocar que se exploten como si no tuviera una relación con la precipitación, con los consecuentes resultados.

Tal como se señaló, la precipitación en la Cuenca El Ahogado se encuentra ampliamente diferenciada entre la época de estiaje y la época de lluvias. Del mismo modo, el comportamiento hidrológico en cada una de las subcuencas varía, aunque no de manera considerable.

Las lluvias se presentan a partir de junio, pero las máximas se presentan en julio hasta cubrir una duración de cinco meses. Los otros siete meses restantes son de estiaje.

Dado los extremos climáticos de la cuenca, el balance hidrológico se modeló tanto para el periodo de estiaje como para el de lluvias, en donde para definir los meses de cada uno fue necesario el apoyo de las estaciones climatológicas localizadas en la cuenca con más de 20 años consecutivos de datos para el periodo 1992-2012.

La cartografía de los paisajes hidrológicos permite conseguir una caracterización detallada de las zonas funcionales de las cuencas hidrográficas. En la Cuenca El Ahogado el área de captación-transporte abarca 60% de su área total, que es donde se encuentran los cursos de agua, sus materiales, sedimentos y nutrientes.

La caracterización de cada una de las fases del ciclo en un balance hidrológico constituye un elemento fundamental para la planeación regional del uso sustentable de los recursos así como para la planeación del medioambiente.

Análisis prospectivo

El análisis prospectivo consiste en integrar el enfoque de riesgo como una de las dimensiones contenidas en las estrategias para evitar desastres naturales relacionadas ante inundaciones que se presentan en la parte baja de la cuenca, por lo que es necesario tratar transversalmente en los siguientes ámbitos: asentamientos irregulares, medioambiente, desarrollo sustentable.

El tema de riesgos naturales ante tormentas de alta intensidad se ha centrado en una primera etapa en el análisis de amenazas, respecto a los sistemas de cuencas con el objetivo de brindar instrumentos y acciones específicas que deben ser desarrollados tanto por autoridades municipales como por organismos especializados. Por ejemplo, de acuerdo con las experiencias vividas en el país, se puede concluir que es relevante la gestión de riesgos; significa incorporar los procesos de Ordenamiento Urbano y Territorial (OUT) que impulsen la toma de decisiones.

Uno de los principales retos, en un análisis prospectivo, consiste en reducir el impacto de los eventos futuros y evitar que se conviertan en desastres, lo cual podrá lograrse en la medida que la variable riesgo sea incorporada en los procesos de planificación y OUT, de tal manera que sobre

Tabla 3. Cuantificación de la pendiente equivalente constante por el Método de Taylor-Schwarz.

(1) Cotas intervalo de clase (msnm)	(2) Diferencia de cotas (m)	(3) Distancia horizontal entre cotas l_i (m)	(4) Distancia horizontal acumulada (m)	(5) Pendiente por segmento $S_i [(2)/(3)]$	(6) $S_i^{1/2}$	(7) $l_i S_i^{1/2}$
1600-1590	10	1198.40	1198.40	0.008344	0.091348	13119.05
1590-1580	10	944.40	2142.80	0.010588	0.102901	9177.702
1580-1570	10	1247.70	3390.50	0.008014	0.089525	13936.87
1570-1560	10	1484.40	4874.90	0.006736	0.082077	18085.32
1560-1550	10	1251.80	6126.70	0.007988	0.089378	14005.62
1550-1540	10	1951.10	8077.80	0.005125	0.071591	27253.31
1540-1530	10	1690.90	9768.70	0.005914	0.076902	21987.55
1530-1520	10	8240.00	18008.70	0.001213	0.034836	236532.49
1520-1510	10	3760.00	21768.70	0.002659	0.051571	72909.10
					$\Sigma = 0.69013$	427007.051

Fuente: Caro Becerra *et al.*, 2012.

la base de lo “construido” se puedan integrar o gestionar procesos que permitan abordar la reducción por vulnerabilidad y el riesgo en forma permanente, sistemática y de manera participativa.

Los desastres son difíciles de predecir y controlar, ya que causan daños a la infraestructura y economía de las localidades, por ejemplo, en la inflación de precios, vivienda, y alimentos, así como la estructura demográfica, entre otros. “El riesgo se configura con la relación entre amenaza y vulnerabilidad, términos interdependientes y directamente proporcionales” (Arenas *et al.*, 2010).

Aminorar estos riesgos supone un esfuerzo por conocer la estructura del medio natural disponible u ocupado por razones de explotación de los recursos naturales y de habitación. Conocer las relaciones entre el medio natural y el medio construido es vital si se quiere evitar efectos adversos.

Para planificar un territorio visto desde el manejo de cuencas se deben identificar los desastres naturales bajo una óptica de riesgo sustentable del sitio y sobre todo las condiciones de vulnerabilidad que persisten por los asentamientos irregulares.

Lo anterior se realizará mediante zonificaciones expresadas o vistas desde mapas y validadas entre los distintos actores que confluyen en lugares amenazados por las inestabilidades propias del sistema natural.

En este contexto, se debe atender, por un lado, la consideración de los riesgos y de los peligros naturales existentes en su vínculo con la localización de los asentamientos humanos como una actividad productiva y, por otro, reconocer que la reducción de la vulnerabilidad ante la posibilidad de ocurrir un desastre requiere de una coordinación adecuada por parte de las autoridades de protección civil.

Asimismo, se reconoce la existencia de desarrollar procesos de OMT ante la evidencia de un uso desordenado de los recursos naturales, pero sobre todo la conciencia de la vulnerabilidad y el consecuente riesgo que una ocupación desordenada del territorio trae como consecuencia.

Conclusiones

Debido a la idea de contar con un inventario de los recursos naturales en la cuenca, así como elaborar los mapas correspondientes a los trabajos de producción, modernización y actualización de la información geográfica en cumplimiento de los objetivos y metas, se ha implementado el Sistema de Información Geográfica (SIG), integrado por tres subsistemas: condiciones físicas, recursos naturales y asentamientos humanos.

El subsistema de recursos naturales ofrece información sobre localización y magnitud de los recursos geológicos,

uso actual del suelo y estado de la vegetación, características físicas, químicas y morfológicas de los suelos (edafología), así como aprovechamientos hidrológicos tanto en calidad como en cantidad y usos del agua. Este sistema de información está integrado por cartografía geológica, topográfica, vegetación e hidrológicas.

La información hidrológica aborda información de aguas subterráneas y superficiales. En la primera se analizan los diferentes materiales que cubren la corteza terrestre, suelos o rocas y sus proyecciones inmediatas hacia el subsuelo; el objetivo es definir el rendimiento o posibilidad de que dichos estratos contengan agua de buena calidad. En la segunda se consideran factores tales como suelo, vegetación y pendiente sobre el terreno, que habrá de determinar el escurrimiento de agua de lluvia y su comportamiento sobre la superficie de la corteza terrestre.

Los asentamientos urbanos en los municipios de Tlajomulco, Tlaquepaque y El Salto han presentado severas inundaciones, que en algunos puntos se han acentuado más los riesgos (tal es el caso de la subcuenca Presa La Rusia y Arroyo Seco, ambas localizadas en la parte baja de la cuenca). Para responder a la problemática de inundaciones y los riesgos que implican se debe entender el proceso natural de las cuencas hidrológicas, las modificaciones asociadas con la urbanización y las condiciones de infraestructura hidráulica previas al proceso urbano.

En los aspectos naturales, prácticamente 80% de la superficie predomina poca o nula pendiente y no permite una velocidad rápida de respuesta a las aguas superficiales.

En síntesis, el crecimiento urbano anárquico modificó el sistema hidrológico e hidrográfico natural de la Cuenca El Ahogado. Aunado a esto, muchos de los nuevos asentamientos urbanos se están desarrollando en áreas donde son totalmente vulnerables a las inundaciones, ya que se encuentran asentados en zonas topográficamente bajas por lo que aumenta el riesgo por inundación, de ahí la importancia y necesidad de establecer un ordenamiento territorial por cuenca hidrográfica.

Además, con base en los sitios identificados, se considera conveniente desarrollar los protocolos de protección a la población en casos donde se presenten eventos extremos de lluvia y realizar estudios adicionales a detalle en las áreas susceptibles de riesgo por inundación.

Por el riesgo de inundaciones, debido a la configuración topográfica y las condiciones de infraestructura, es necesario delimitar las áreas donde sea totalmente vulnerable, así como desarrollar o construir la infraestructura hidráulica que reduzca los riesgos y que los asentamientos irregulares cumplan con la normatividad vigente.



- Aparicio Mijares, F. J. (2007). *Fundamentos de hidrología de superficie*. LIMUSA, Noriega Editores.
- Arenas, F., Lagos, M. e Hidalgo, R. (2010). *Los riesgos naturales en la planificación territorial*. Santiago de Chile, Chile: Pontificia Universidad Católica de Chile. Disponible en <http://repositorio.uc.cl/xmlui/bits-tream/handle/123456789/1765/587388.pdf?sequence=1>
- Boem, B. y Sandoval, M. (1999). *La sed saciada de la Ciudad de México: la nueva cuenca Lerma-Chapala-Santiago. Un ensayo metodológico de lectura cartográfica*. Morelia: El Colegio de Michoacán.
- Caro Becerra, J. L., Lujan Godínez, R., Brena Beceril, A. (2012). *Ordenamiento urbano y territorial visto desde el manejo de cuencas a través de un SIG, en la Laguna de Cajititlan, estado de Jalisco*. (proyecto).
- CEAS (2010). Sistema de Información Geográfica "El Ahogado". Guadalajara, Jalisco, México. Comisión de Estatal Agua y Saneamiento. Disponible en http://www.ceajalisco.gob.mx/publicaciones/pdf/ptar_el_ahogado.pdf
- CEAS (2010). Programa hídrico del estado de Jalisco 2007-2030: Guadalajara, Jalisco, México. Comisión Estatal de Agua y saneamiento. Disponible en <http://www.conagua.gob.mx/OCLSP07/Contenido/Documentos/ProgHidricodeJalisco2030.pdf>.
- CEAS (2012). Sistema de Información Geográfica. El Ahogado. Guadalajara, Jalisco, México. Comisión de Estatal Agua y Saneamiento. Disponible en http://www.ceajalisco.gob.mx/publicaciones/pdf/ptar_el_ahogado.pdf
- Congralton, R. y Grenn, K. (1992). *Introducción a los Sistemas de Información Geográfica. Manual de manejo de cuencas*. El Salvador: Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Chávez Hernández A. (2009). *Programa de ordenamiento ecológico territorial del municipio de Tlajomulco de Zúñiga POETT*. Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco.
- Campos Aranda, D. F. (1998). *Procesos del ciclo hidrológico*: Universitaria Potosina.
- Cotler, H. (comp.) (2006). *El manejo integral de cuencas en México: estudios y reflexiones para orientar la política ambiental*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología.
- Díaz Delgado, C., Mamadou Bâ K., Iturbide Posadas, A., Esteller, Ma. V., Reyna Sáeng f. (1999). Estimaciones de las características fisiográficas de una cuenca con del SIG y MEDT: caso del curso Alto del río Lerma, Estado de México. *CIENCIA ergo-sum*, 6(2).
- Dourojeanni, A., Jouravlev, A., Chávez, G. (2002). Gestión del agua a nivel: teoría y práctica. CEPAL-Serie Recursos Naturales e Infraestructura.
- GEOEX (2012). *Geología y exploraciones, geohidrología, hidrología; hidrogeoquímica, hidráulica*. Disponible en <http://geoex.com.mx/>
- Gleason Espíndola, J. A. (2012). Guadalajara desperdicia el agua de lluvia. *Gaceta Universitaria Ecología*. Guadalajara, Jalisco: Universidad de Guadalajara. Disponible en http://www.gleasonconsulting.com/instalaciones/desperdicio_agua.pdf
- González Salazar, A., Juárez, A., Loza Ramírez, L. (2008). *Curvas de intensidad, duración y periodo de retorno como herramienta de análisis en la prevención de riesgos por precipitaciones intensas en la Zona Metropolitana de Guadalajara. Sincronía*. Guadalajara: Centro Universitario de Ciencias Sociales y Humanidades CUCSH, Universidad de Guadalajara. Disponible en <http://sincronia.cucsh.udg.mx/salazar.htm>
- IMTA (Instituto Mexicano de la tecnología). (2000). *ERIC Versión 2* [CD]: Instituto Mexicano de la Tecnología del Agua.
- Instituto Mexicano de la Tecnología del Agua (IMTA), SEMARNAT (2009). *Estrategia general para el rescate ambiental de la sustentabilidad de la cuenca Lerma-Chapala*.
- Jiménez, O. F. (2006). *Enfoques básicos del manejo y la gestión de las cuencas hidrográficas*. Turrialba: Centro Agronómico Tropical de Investigación y de Enseñanza
- Marín Stillman, L. E. (2008). *El agua en México: retos y oportunidades*. México: Instituto de Geofísica, UNAM.
- Mc Culligh, C. (2006). Respirar veneno en Juanacatlan y El Salto Jalisco. *La Jornada*. Disponible en <http://www.jornada.unam.mx/2006/09/25/eco-c.html>
- Mc Cully, P. (2004). *Ríos silenciados: ecología y política de las grandes represas*. Buenos Aires: Proteger Ediciones.
- Mendoza Pérez, C., Venegas Herrera, A. C. (2003). Desbordado crecimiento de la cuenca El Ahogado. Guadalajara, Jalisco, *Gaceta Universitaria*. Universidad de Guadalajara. Disponible en <http://www.gaceta.udg.mx/Hemeroteca/paginas/304/304-20.pdf>
- Monsalve Sáenz, G. (1995). *Hidrología en la ingeniería*. Alfaomega.
- Mosiño, P. A. (1974). Los climas de la República Mexicana, en Zoltan de Cserna, *El escenario geográfico* (pp. 57-172). México: Secretaría de Educación Pública, Instituto Nacional de Antropología e Historia.
- Priego Santander, A. y Cotler, H. (2004). El análisis del paisaje como base para el manejo integrado de cuencas: el caso de la cuenca Lerma-Chapala, en H. Cotler (comp.), *El manejo integral de Cuenca en México, estudios y reflexiones para orientar la política ambiental* (pp. 63-75). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología.
- Sagarpa (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación). (2000). *Hidrología aplicada a las pequeñas obras hidráulicas*. Colegio de Postgraduados.
- Toledo, A. y Bozada, L. (2002). *El delta del río Balsas. Medio Ambiente, pesquería y sociedad*. México: Instituto Nacional de Ecología (INE-Semarnat), El Colegio de Michoacán.
- Valdivia Ornelas, L., Castillo Aja, M. del R., González Salazar, A. (2005). Las inundaciones en la zona metropolitana de Guadalajara. *Carta Económica Regional*. Disponible en <http://cartaeconomica.cucea.udg.mx/administracion/uploads/articulo59.pdf>

Páginas Web

- Centro virtual de Información del Agua. (2013). Disponible en <http://www.agua.org.mx>
- Comisión Estatal del Agua de Jalisco. (2013). Cuenca El Ahogado. Disponible en <http://www.ceajalisco.gob.mx/ahogado.html>
- Sistema de Información Geográfica S.A. de C.V. (SIG) (2013). Empresa mexicana líder en aplicaciones geográficas. Disponible en <http://www.sigsa.info/ESRI>
- Geología y exploraciones, geohidrología, hidrología, hidrogeoquímica e hidráulica. (2013). Disponible en www.geoex.com.mx/
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2010). Disponible en <http://www.inegi.org.mx/>

Cartografía

- INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática). (1993). Carta Topográfica F13D65. Guadalajara Oeste. Escala 1:50000.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática). (1993). Carta Topográfica F13D66. Guadalajara Este. Escala 1:50000.

Figura A 1. Altimetría de la Cuenca El Ahogado (Escala: 1:50000).

