



Geomorfología como factor de riesgo a inundaciones en la cuenca hidrográfica de Mulegé, Baja California Sur, México.

Geomorphology as a flooding risk factor in Mulegé watershed,
Baja California Sur, México.

Saúl Chávez López y Arón Navarro Mendoza

Resumen

Resumen

Los registros de inundaciones en el poblado de Mulegé, datan desde su fundación, teniendo como amenaza principal a los fenómenos meteorológicos; a los que se asocian lluvias intensas de distribución regional, en cuyo contexto para el diagnóstico de inundaciones, es relevante analizar los aspectos geomorfológicos de la cuenca y el incremento del área urbana. Para lo cual en el presente trabajo, se emplean técnicas convencionales de geología de campo, validadas mediante el modelado de escenarios de inundaciones fluviales, de acuerdo a la metodología del Centro Nacional de Prevención de Desastres.

En la cuenca se reconocieron tres unidades geomorfológicas: sierras, llanura aluvial y franja costera; las cuales se encuentran disectadas por una densa red de drenaje dendrítico de régimen intermitente, que en su conjunto integran una cuenca exorreica de séptimo orden. La forma de embudo de la cuenca y la alta densidad de drenaje destacan como factor que de manera natural incrementa la frecuencia e intensidad de inundaciones; esto debido a su amplia área de captación de lluvia en el interior de la cuenca, la cual se reduce en su porción baja formando una cañada, en donde se ubica el poblado, y cuya zona por su bajo relieve topográfico corresponde a un área intensamente inundable. Adicional a las características intrínsecas de la cuenca (forma, relieve topográfico, pendientes, litología, red fluvial), el establecimiento e incremento del área urbana, en el entorno geomorfológico de la parte baja de la cuenca, cobra importancia al visualizar dicho incremento como pérdida de área de escurrimiento, el cual se incorpora como factor de riesgo inducido, al incrementar la vulnerabilidad a inundaciones. Generando entre los habitantes del poblado, la percepción de que las inundaciones son más frecuentes e intensas; como las ocurridas en el año 2009 durante el huracán Jimena y Odile en el año 2014, en las que el tirante de agua superó los dos metros de altura. Situación que se validó con el modelado de inundación fluvial, obteniéndose que la lluvia registrada de 305 mm/24 h, en la estación meteorológica Mulegé, durante el huracán Jimena, fue equivalente a la calculada para un periodo de retorno de 100 años y para el huracán Odile, la lluvia registrada de 184 mm/24 h, fue equivalente a la calculada para un periodo de retorno de 25 años. Por lo que podemos afirmar que el poblado de Mulegé se encuentra expuesto a un constante riesgo a inundaciones súbitas, pasando el riesgo a ser la suma de los procesos de origen antropogenético, interactuando con los naturales.

Palabras clave: Geomorfología, área urbana, riesgo, vulnerabilidad, inundación



Abstract

Abstract

Flooding records in the town of Mulegé have indicated since its founding date that meteorological phenomena, such as intense regional rainfall events, have been the main flood threat. In diagnostic flooding assessments, the geomorphological aspects of a watershed and increases in the urban area have been highly relevant. Considering these factors, this study implemented conventional field geology techniques and validated fluvial flooding through modeling scenarios according to the methodology of the Centro Nacional de Prevención de Desastres (National Center for Disaster Prevention).

In Mulegé watershed, three geomorphological units were identified: sierras, alluvial plain, and coastal belt. These units are crossed by a dense network of dendritic drainage channels characterized by an intermittent regime, which as a whole forms a seventh-order exoreic watershed. The funnel-shaped watershed and the high density of drainage channels are factors that naturally increase flooding frequency and

intensity. Specifically, its wide pluvial catchment area within the watershed decreases in size at its lower portion, forming a small valley where the town is located. Thus, the lower watershed is a highly flood-prone area because of its low topographic relief. In addition to its intrinsic characteristics (form, topographic relief, slopes, lithology, fluvial network), the establishment and increase of the urban area in the geomorphological environment of this lower portion has significantly reduced the runoff area, representing a human-induced risk that increases flooding vulnerability. The inhabitants in Mulegé perceive flooding to be increasing in frequency and intensity, as those that occurred in 2009 during Hurricane Jimena and in 2014 during Hurricane Odile, in which flood depths exceeded two meters in height. These flooding scenarios were validated by the fluvial flood model: Rainfall recorded at the Mulegé meteorological station during Hurricane Jimena (305 mm in 24 h) was equivalent to that calculated for a 100-year return period and during Hurricane Odile (184 mm in 24 h) to a 25-year return period.

Therefore, we confirm that the town of Mulegé is exposed to a continuous risk of sudden flooding that is defined by the sum and interaction of distinct processes of natural and anthropogenic origins.

Key words: Geomorphology, urban area, risk, vulnerability, flooding.

Introducción

Introducción

El Estado de Baja California Sur es una región árida, sin embargo la mayoría de sus ciudades y poblados, en algún momento de su historia se han visto afectados por inundaciones, debido a su ubicación geográfica, que lo destaca entre los cinco estados del país con mayor incidencia de huracanes, los cuales se originan en el Océano Pacífico Oriental (Latorre y Penilla 1988).

En el poblado de Mulegé los primeros registros de inundaciones datan de 1771; otras inundaciones documentadas que llegaron a adquirir dimensiones de desastre por las pérdidas humanas, se dieron en los años de 1931, 1957 y 1959 (Yee, 1986). Antecedentes de inundaciones recientes se tienen en los años de 2008 con el huracán Nortbert, en 2009 Jimena, en 2014

Odile y en 2016 con el huracán Newton.

Aún cuando los fenómenos hidrometeorológicos (depresiones, tormentas tropicales, huracanes), hacen recurrente las inundaciones en el poblado de Mulegé y a que se ha considerado la reubicación del poblado en diferentes ocasiones (Yee, 1986; Cota, 2005), la información referente al tema en la región es escasa.

De los trabajos publicados se encuentra el de Chávez y Avilés (2017) de Diagnóstico y escenarios de peligro por inundación fluvial en Ciudad Insurgentes, y de manera general el Atlas de Riesgos y Peligros Naturales del Municipio de Mulegé, elaborado por la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL, 2011), en el cual se abordan diferentes temas como los riesgos por vulcanismo, sismicidad, erosión, inestabilidad de laderas e inundaciones; estas últimas representadas mediante la digitalización en ortofotos, de las áreas inundadas durante los huracanes Nortbert en el año 2008 y Jimena en 2009 (SEDESOL, 2011: Figura 1).

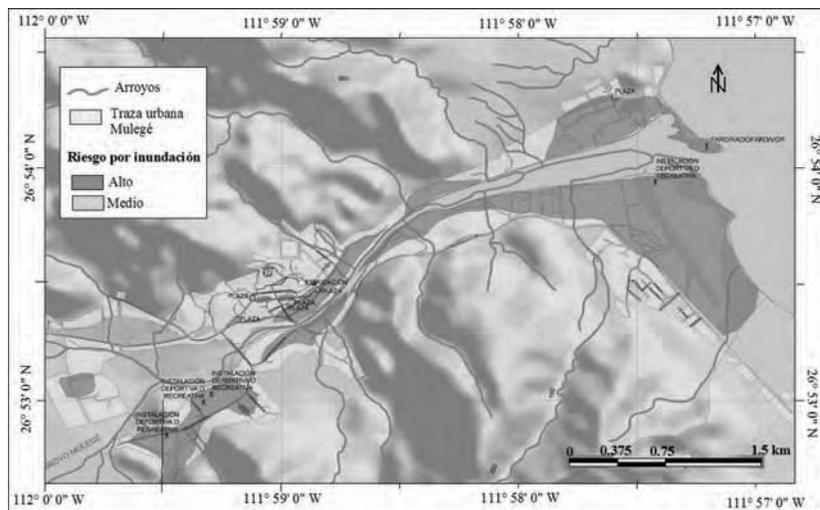


Figura 1. Mapa de riesgos por inundaciones en Mulegé; el polígono en color crema indica el área urbana, el de color rojo el área de alto riesgo a inundación y el de color naranja, el área de riesgo medio a inundación (Tomado y modificado del Atlas de Riesgos y Peligros Naturales del Municipio de Mulegé, SEDESOL, 2011).

Según el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED, 2004), refiere que lluvias de entre 50 a 70 mm, en un lapso de 24 horas, pueden convertirse en un riesgo para producir inundaciones; aunque no

siempre es así ya que la frecuencia e intensidad con que se produzcan depende de otros factores, dentro los que destacan los geomorfológicos y patrón fluvial de la cuenca. En este sentido para el diagnóstico de inundaciones fluviales es importante considerar la combinación de la forma de la cuenca, con el de su sistema de drenaje fluvial, puesto que durante lluvias intensas estos aspectos influyen en los máximos o picos de la inundación (Gutiérrez, 2008). A lo que se suma la relación entre inundaciones y la altura del terreno; puesto que terrenos de bajo relieve topográfico, son más vulnerables a inundarse como producto de fuertes precipitaciones (Sánchez y Batista, 2005).

Otro aspecto a considerar es el incremento del área urbana ya que se incorpora en el entorno geomorfológico como factor inducido (antrópico), (Chávez y Avilés, 2017). Consecuentemente estos aspectos incrementan la vulnerabilidad a inundaciones, que impactan en el medio físico y biológico de la cuenca, y al mismo tiempo en los aspectos socioeconómicos del poblado, así



como en la seguridad e integridad de sus habitantes.

De acuerdo a lo anterior en el presente trabajo se abordan los aspectos geomorfológicos de la cuenca de Mulegé, así como el incremento del área urbana como aspectos que incrementan el riesgo ha inundaciones en la parte baja de la cuenca; lo cual se justifica, si consideramos que el poblado ha adquirido importancia turística, generando un lento pero constante aumento en su población y por consiguiente en el incremento de su área urbana. Contexto ambiental que aún cuando en el presente trabajo se presenta como una realidad local, es posible afirmar que situaciones muy parecidas se presentan en todo México.

Área de estudio *Area de estudio*

La cuenca y poblado de Mulegé, se ubica en la porción noreste del estado de Baja California Sur, su ubicación geográfica se muestra en la Figura 2.

De acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 1996), el clima es muy seco cálido con temperatura media anual de 24 °C; y precipitación media anual de 122.5 mm; las características climáticas

condicionan a su vez la distribución de vegetación en la región, caracterizada principalmente por matorral Sarcocaul. Por su parte la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT, 1998), reporta para la región suelos tipo arenoso, el cual presenta fase física de tipo lítico, textura muy gruesa y permeabilidad alta.

Desde el punto de vista fisiográfico, el Consejo de Recursos Minerales (CRM, 1999) ubica a la cuenca de Mulegé en la parte media y vertiente oriental de la Subprovincia Fisiográfica Sierra de La Giganta, integrada en esta porción principalmente por rocas volcánica y volcánico-clástica, con un rango estratigráfico del Terciario al Cuaternario. Su relieve es de sierras y mesetas, cuyas bajadas con lomeríos descienden hacia el Golfo de California con pendiente pronunciada, ocasionando que su costa en su mayor parte sea acantilada. Estructuralmente la región se encuentra afectada por un patrón de fallas normales escalonadas con rumbo predominante NW-SE, producto de una tectónica de extensión relacionada a la apertura del Golfo

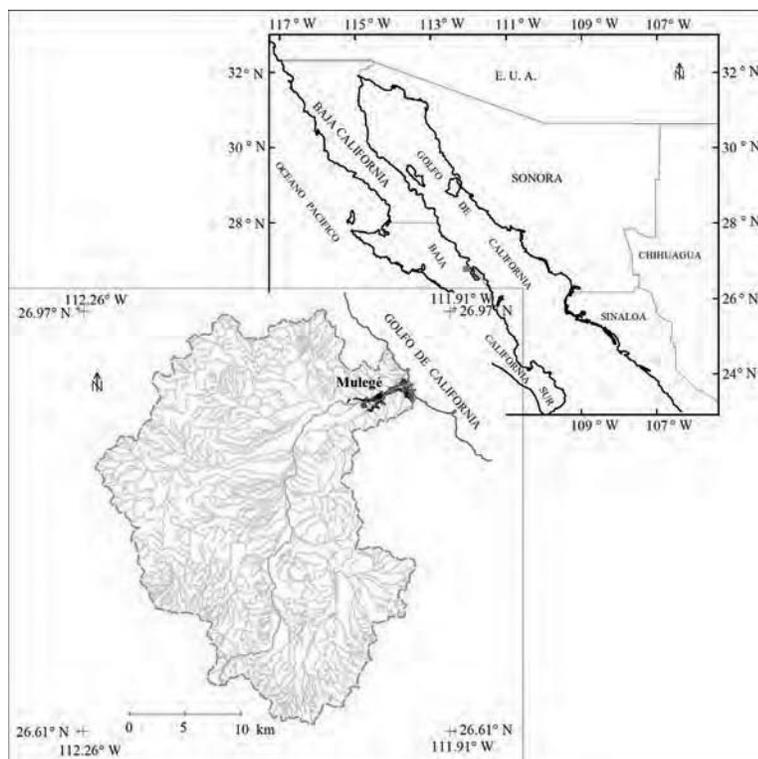


Figura 2. Ubicación geográfica de la cuenca hidrográfica y poblado de Mulegé.

de California, que afecta a toda la secuencia cronoestratigráfica (Casarrubias y Gómez, 1994; CRM, 1999).

Materiales y métodos

Como plataforma de trabajo y elaboración de mapas, se empleó el programa de cómputo Arc-GIS versión 10.2; apoyados con el programa Surfer versión 8, para la elaboración de figuras, así como la hoja de cálculo Office excel 2007, para la elaboración de las bases de datos de precipitación y huracanes así como de gráficos.

Para el mapa base se emplearon las cartas topográficas vectoriales de INEGI: G12A56, G12A57, G12A66 y G12A67, escala 1:50,000; con el cual a su vez, se generó el modelo digital de elevación (MDE) con resolución de 15 m, empleado para obtener los parámetros morfométricos de la cuenca (área, perímetro, pendientes), y red hidrográfica tipificada de acuerdo al criterio de Horton y Strahler, así como empleado para el modelaje de escenarios de inundación fluvial.

La delimitación y digitalización preliminar de unidades geomorfológicas se efectuó

empleando el mapa base e imágenes SPOT pancromáticas del año 2010: E557/296, E557/297, E558/296 y E558/297; siguiendo el criterio de rupturas de pendientes de Lugo-Hubp (1986).

El trabajo de campo se efectuó los días del 9 al 14 de marzo, 25 al 30 de junio y del 1 al 7 de julio de 2016; consistió en el reconocimiento de la cuenca y descripción de unidades geomorfológicas, corroborando la litología con apoyo de la carta geológica minera G12-5 Loreto escala 1:250,000 del Consejo de Recursos Minerales y GPS Mobile Mapper 6 marca Magellan; así como recolección de información de inundaciones históricas y bibliografía con funcionarios del Municipio de Comondú, Protección Civil y pobladores de Mulegá, la cual se empleó para la delimitación de inundaciones y validar el modelado de escenarios de inundaciones fluviales.

Para el análisis de precipitación se utilizaron los registros de lluvias por día, para los años de 1980 al 2015, contenidos en el programa de computadora Eric III versión 2.0 del Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2009) y actualizados en línea con la base de datos CLICOM (2015)). La incidencia de huracanes y sus trayectorias se obtuvieron de la base de datos de Unisys Weather (2016) y la precipitación registrada durante estos se obtuvo de la base de datos generada para el análisis de precipitación. Para analizar la geomorfología como factor de riesgo a inundaciones, se empleo la información del apartado de Geomorfología e hidrografía, siguiendo el criterio de combinación de forma de la cuenca, con el de su sistema de drenaje fluvial de Gutiérrez (2008) y la relación entre inundaciones y la altura del terreno de Sánchez y Batista (2005, Tabla 1).

Tabla 1. Vulnerabilidad a inundación del terreno según su altura sobre el nivel del mar (Sánchez y Batista, 2005).

Altura (msnm)	Característica
0 – 20	Intensamente inundable
20 – 40	Muy Inundable
40 – 80	Inundable
80 – 120	Medianamente Inundable
120 – 160	Poco Inundable
Más de 160	No Inundable



El incremento del área urbana, se efectuó empleando el mapa base, y la digitalización del área urbana de las fotografías aéreas del año 1973 de INEGI, escala 1:75,000 línea 18 fotos 7 y 8, ortofotos del año 1999, G12A57A y G12A57C de INEGI, escala 1:75,000 y la imagen satelital de Google Earth para el año 2016, escala 1: 50,000.

Para validar la geomorfología de la cuenca como factor de riesgo y vulnerabilidad natural a inundaciones así como el efecto del incremento del área urbana en la parte baja de la cuenca, se emplearon los datos de precipitaciones máximas de la base generada, para estimar las lluvias y elaborar mapas de isoyetas para periodos de retorno¹ de 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500 y 1000 años, empleando el método Gumbel. Dicho método se emplea con la finalidad de que los resultados del modelado sea compatible con los de los Atlas de Riesgos Municipales y Estatales, según la metodología del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED, 2013;

¹ es una representación usada comúnmente para presentar un estimativo de la probabilidad de ocurrencia de un evento determinado en un periodo de tiempo determinado.

Ramos, 2006; Salas, 2011). Como parte de la metodología se utilizó la información generada en los apartados de geomorfología e hidrografía y precipitación e incidencia de huracanes; así como el Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas SIATL de INEGI (2016); de donde se obtuvo el coeficiente de escurrimiento² de la cuenca y los cálculos de caudales³ para los diferentes periodos de retorno estimados. Para el modelaje de escenarios de peligro se empleó el programa HEC-RAS (*Hidrologic Engineering Centers River Analysis System*), que permite realizar simulaciones hidráulicas unidimensionales (ver figura 11).

Resultados Precipitación e incidencia de huracanes

En la Tabla 2, se anotan las coordenadas geográficas de las estaciones meteorológicas Mulegé (3038), San José de Magdalena (3103), San Miguel (3156) y San Martín (3158), así como la precipitación promedio anual registrada entre los años de 1980 al 2015. Su distribución espacial e isoyetas se muestra en la Figura 3; cuya tendencia espacial indica valores altos de precipitación en las sierras (estación San Miguel: 283 mm) y se reduce gradualmente conforme se desciende en elevación hasta llegar a la llanura aluvial (estación Mulegé: 158 mm).

Tabla 2. Precipitación promedio anual para el periodo de 1980 al 2015 de las estación climatológica Mulegé y las ubicada en las inmediaciones de la cuenca (SMN, 2009; CLICOM, 2015).

Estación	Clave	Latitud N	Longitud W	Altura (msnm)	Prec. media anual (mm)
Mulegé	3038	26.883	111.983	35	158
San José de Magdalena	3103	27.050	112.233	230	216
San Miguel	3156	26.720	112.305	400	283
San Martín	3158	26.617	112.350	350	177

Los datos que se grafican en la Figura 4, muestran la tendencia de precipitación interanual en la región de la cuenca de Mulegé, así como lo que podemos referir como lluvias de temporada, que en general son

² o escorrentía la relación entre la cantidad de agua precipitada sobre una superficie y la cantidad de agua que escurre superficialmente (ambas expresadas en mm).

³ es la cantidad de fluido que circula a través de una sección de tubería, cañería, oleoducto, río, canal, ... por unidad de tiempo.

escasas y aisladas, con diferencias notables en su distribución; ya que cuando se llegan a presentar generalmente son de cobertura localizada, y

superan los 20 mm, de marzo a junio meses de estiaje y de julio a septiembre los meses lluviosos con precipitaciones que llegan a superar los 50 mm.

Los meses que referimos como lluviosos son los que presentan la mayor probabilidad de ocurrencia de fenómenos meteorológicos (depresión tropical, tormenta tropical, huracanes) con énfasis en los meses de agosto a septiembre; cuyas lluvias cobran importancia por su cobertura regional pasando a ser la principal amenaza que condiciona el riesgo a inundaciones en la cuenca y poblado de Mulegé.

De acuerdo a información de Unisys Weather, entre los años de 1980 al 2017, en un radio de 250 km a partir de la cuenca de Mulegé, se acercaron 24 huracanes (Tabla 3, Figura 5), promediando 0.6 huracanes por año; aunque es de precisar que en la región de los 250 km no todos impactaron con categoría de huracán como se anota en la información de la Tabla 3 y Figura 5. Sin embargo de la información de la Tabla 3, es de hacer notar que la mayoría de los fenómenos meteorológicos que impactaron la región de los 250

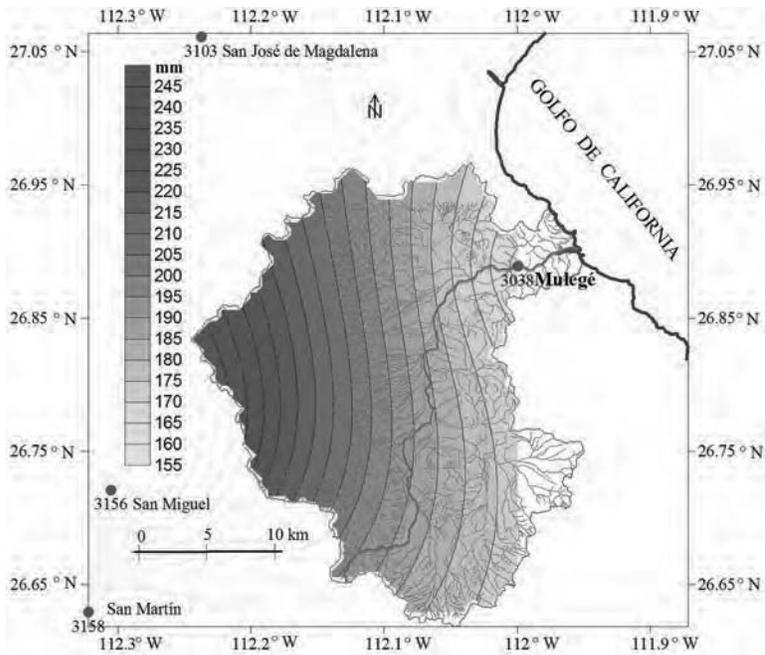


Figura 3. Ubicación espacial de las estaciones climatológicas y distribución de isoyetas del promedio anual para el periodo de 1980 al 2015, en la cuenca de Mulegé (SMN, 2009; CLICOM, 2015).

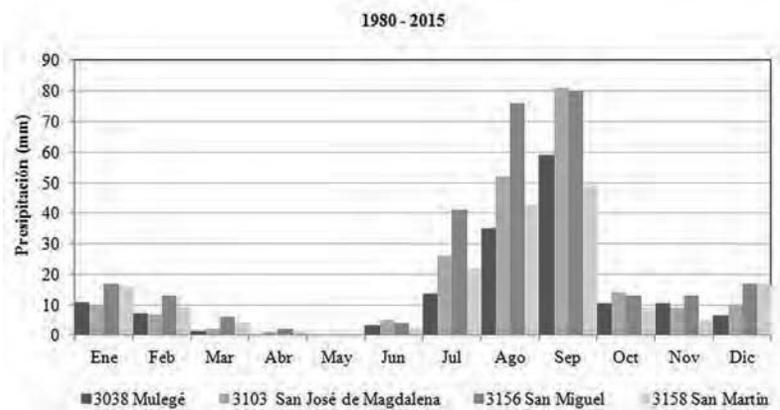


Figura 4. Precipitación promedio mensual en la región de la cuenca de Mulegé, para el periodo de 1980 al 2015 (SMN, 2009; CLICOM, 2015).

se presentan al paso de bandas de nubosidad, por lo que mientras en una zona llueve en áreas adyacentes puede no caer una sola gota, o bien puede haber años con promedios anuales de lluvias altos y años en que son escasas o nulas. En general en la información de la Figura 4 se distinguen tres periodos que van de: octubre a febrero con precipitaciones que no



km, registraron precipitaciones que superaron en un lapso de veinticuatro horas los promedios mensuales e incluso los anuales. De igual manera es de hacer notar que las trayectorias de los huracanes que se muestran en la Figura 5, antes de alcanzar la región de la cuenca de Mulegé, primero afectan la región de la cuenca Ciudad Insurgentes, región en la cual Chávez y Avilés (2017), mencionan que los aspectos geomorfológicos de la cuenca del arroyo Insurgentes no son un factor que condicione el riesgo a inundaciones, reportando 0.8 huracanes por año; sin embargo aún cuando la incidencia de huracanes es mayor, las inundaciones no son tan recurrentes; ya que entre los años del 2000 al 2017 en Ciudad Insurgentes se registraron inundaciones solo durante el huracán Norbert en 2008 y Jimena en 2009; mientras que las inundaciones en la cuenca de Mulegé se han producido durante el huracán Juliette en el año 2001, Marty en 2003, John en 2006, Norbert en 2008, Jimena en 2009, Odile en 2014 y Newton en el año 2016.

Tabla 3. Huracanes que se acercaron en un radio de 250 km a partir de la cuenca de Mulegé, entre los años de 1970 al 2017 (Unisys Weather, 2016) y precipitación registrada en la estación meteorológica de Mulegé y las ubicadas en las inmediaciones de la cuenca (SMN, 2009; CLICOM, 2015).

Huracán	Año	Periodo (inicio-fin)	Cat. impact.	Día	Precipitación registrada (mm)			
					3038	3103	3156	3158
Norbert	1984	14 – 26 sep	Tt	25-sep	0	24	15	18
Raymond	1989	26 sep – 5 oct	Tt	04-oct	0	0	16	17
Lester	1992	20 – 24 ago	H1	23-ago	14	17	190	185
Hilary	1993	17-27 ago	Tt	25-ago	36.3	16	15	42
Frank	1998	6 – 10 ago	Dt	08-ago	86.5	126	13	0
Juliette	2001	21 sep – 3 oct	H1	29-sep	215	116	57	2.7
Ignacio	2003	22 – 27 ago	H2	26-ago	20	48.5	0	25
Marty	2003	18 – 24 sep	H2	22-sep	94	129.5	83	53
Javier	2004	10 – 19 sep	Dt	19-sep	0	0	52	22
Otis	2005	28 sep – 3 oct	Dt	02-oct	2	0	15	0
John	2006	28 ago – 4 sep	H2	02-sep	209	313	231	58
Henriette	2007	30 ago – 6 sep	H1	05-sep	11.5	9	18	9
Julio	2008	23 – 26 ago	Dt	25-ago	130	81	-	100
Norbert	2008	4 – 12 oct	H2	-	-	-	-	-
Jimena	2009	29 ago – 4 sep	H2	02-sep	305	200	215	70
Georgette	2010	21 – 23 sep	Tt	-	0	0	0	0
Norman	2012	27 – 29 sep	Tt	29-sep	41	48.5	18	0
Paul	2012	13 - 17 oct	Dt	16-oct	54.5	111.5	65	0
Juliette	2013	28 – 30 ago	Tt	29-ago	15.5	12.3	0	10
Octave	2013	13 – 15 oct	Tt	14-oct	82	29.5	14	68
Odile	2014	10 – 17 sep	H4	16-sep	184	350	420	450
Blanca	2015	31 may – 9 jun	Tt	07-jun	91	140.7	0	26
Sixteen	2015	18 – 21 sep	Dt	20-sep	60	89.5	63	55
Newton	2016	4-7 sep	H1	-	-	-	-	-

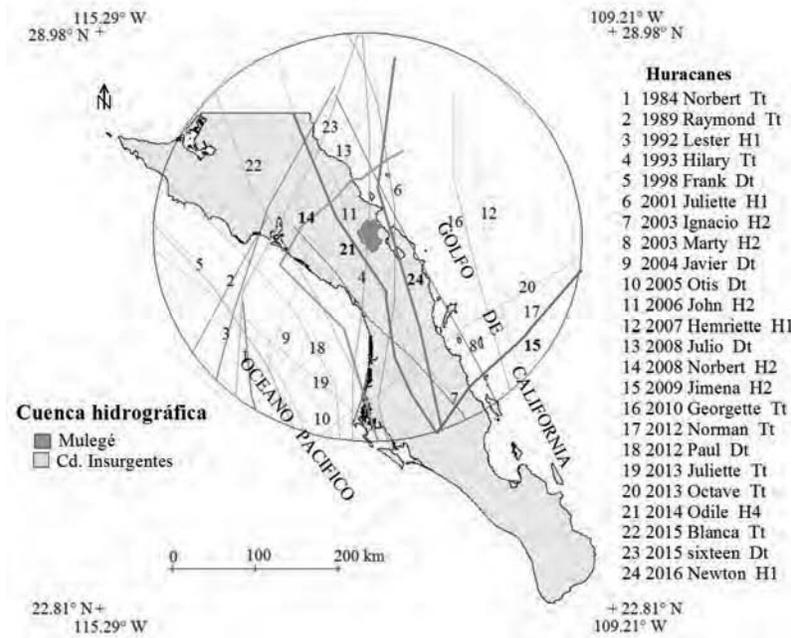


Figura 5. Trayectorias de huracanes que se acercaron en un radio de 250 km a partir de la cuenca de Mulegé, entre los años de 1970 al 2017 (Unisys Weather, 2016). Categoría de impacto: depresión tropical (Dt), tormenta tropical (Tt), Huracán (H1), el número adjunto corresponde a la categoría de acuerdo a la escala Saffir-Simpson.

Geomorfología e hidrografía

La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2015), ubica a la cuenca hidrográfica de Mulegé en la región hidrológica RH5, Baja California Centro-Este (Santa Rosalía); que se clasifica como cuenca exorreica de régimen intermitente de séptimo orden. Presenta un área de 686.5 km², y perímetro de 159.3 km; su forma es de embudo con 23.5 km de amplitud en la parte media, la cual se reduce hacia su parte baja entre las sierras Azteca y Guadalupe a 5 km (Figura 6).

En el área de la cuenca se distinguen tres unidades geomorfológicas, que corresponden

a: Sierras, Llanura aluvial y Franja costera (Figura 6).

Sierras, se diferencian en alta (I) y baja (I'), sus mayores elevaciones integran el parteaguas que limitan la cuenca:

Sierra alta (I): la integra las sierras San Baltasar, Zacatecas y El Cardonal que se distribuyen al oeste y sur de la cuenca (Figura 6). Se caracteriza por montañas con elevaciones superiores a los 700 metros sobre el nivel del mar (msnm) y pendientes de moderadas a pronunciadas que varían de

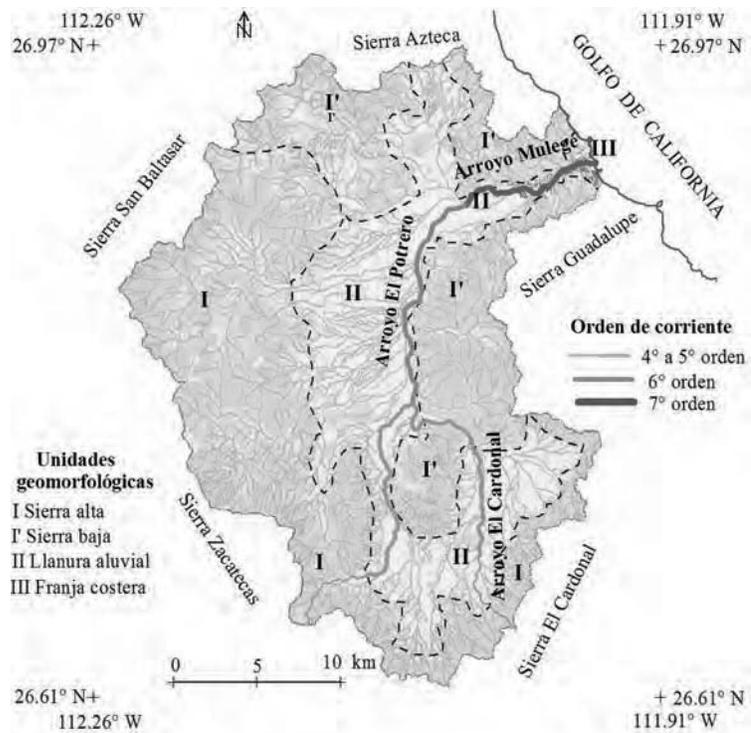


Figura 6. Unidades geomorfológicas siguiendo el criterio de rupturas de pendientes de Lugo-Hubb (1986) y orden de corriente en la cuenca de Mulegé, de acuerdo al criterio de Horton y Strahler.

27 a 50°, lo que condiciona un coeficiente de escurrimiento de 20 %. Sierra baja (I'), la integra las sierras Azteca ubicada al norte y Guadalupe al este de la cuenca, no sobrepasan los 600 metros de altura con pendientes moderadas que varían de entre 13 a 45°, con coeficiente de escurrimiento de 10 %.

Las rocas que integran esta unidad geomorfológica son basalto, brecha volcánica y conglomerado volcanoclástico.

Llanura aluvial (II), esta unidad corresponde a la parte central de la cuenca, se distribuye entre la cota topográfica de 20 a los 120 msnm, se encuentra bordeada por las sierras. Predominan los depósitos del Cuaternario de arena gruesa muy mal seleccionada; se caracteriza por su amplitud y poca pendiente (6°) con coeficiente de escurrimiento de 0 a 5 %. El relieve se ve interrumpido por el denso patrón fluvial de tipo dendrítico y régimen intermitente que desciende desde las sierras y que de acuerdo al sistema de Horton y Strahler, en estas es de entre primero a cuarto orden. Su arroyo principal es de 43 km de longitud, el cual drena hacia

el Golfo de California. Los primeros 16 km que van de la cota 700 a 80 msnm, los pobladores de la región lo identifican como arroyo El Cardonal, el cual en la cabecera de la cuenca presenta un relieve escarpado y cauce angosto que desciende, a un valle intermontano en donde tiende ampliarse formando una corriente que pasa a quinto orden. El segmento del arroyo, que va de la cota 80 a 20 msnm (17 km longitud), es conocido como arroyo El Potrero, presenta pendiente suave y un cauce amplio de sexto orden; los depósitos en esta porción van de arena gruesa a cantos rodados de más de 50 cm de diámetro (Figura 7a). La porción del arroyo que va de la cota de los 20 msnm hasta la línea de costa, es conocido como arroyo Mulegé, presenta pendiente suave y un valle aluvial angosto formando una cañada entre las sierras Azteca y Guadalupe, su corriente pasa de sexto a séptimo orden, los depósitos sedimentarios en esta porción van de arena gruesa, a cantos rodados de entre 10 a 20 cm de diámetro (Figura 7b).



Figura 7. Depósitos sedimentarios en la llanura aluvial: a) arena gruesa a cantos rodados de más de 50 cm de diámetro en el tramo del arroyo El Potrero, b) arena gruesa, a cantos rodados de entre 10 a 20 cm de diámetro en el tramo del arroyo Mulegé.

La llanura aluvial, aún al estar integrada por material sedimentario permeable, poca pendiente y bajo coeficiente de escurrimiento, el material sedimentario como el que se muestra en la Figura 7, infiere que el caudal de agua que se genera en el arroyo principal es lo suficientemente importante como para transportarlo.

Franja costera (III), esta unidad geomorfológica se distribuye entre la línea de costa y los 10 msnm. En esta porción de la cuenca el bajo relieve topográfico ocasiona que el cauce del arroyo Mulegé se encuentre inundado por agua de mar, dando origen al estero del mismo nombre, con extensión aproximada de 3 km y profundidad de entre 0.5 a 1.5 m,

se encuentra limitado por vegetación de manglar, con depósitos de arena muy fina, limo y arcilla. La línea de costa de la cuenca (desembocadura) es de 5 km de extensión, su costa es acantilada, desarrollada por la cercanía de las sierras Azteca y Guadalupe al mar, por lo que la amplitud de playa arenosa es reducida; sin embargo la desembocadura de la cuenca se mantiene parcialmente cerrada por una barrera arenosa (*tómbolo*) cuyo desarrollo en dirección NW-SE une el margen norte del arroyo con el cerro El Sombrero.

Geomorfología como factor de riesgo a inundaciones

En el contexto geomorfológico es importante considerar que una vez que la precipitación llega al suelo, la conversión del flujo dependerá de las características físicas de la cuenca (Gutiérrez, 2008), por lo que para destacar los aspectos geomorfológicos e hidrográficos de la cuenca de Mulegé como factor de riesgo a inundaciones, en la Figura 8 a las unidades geomorfológicas se sobrepone la relación entre inundaciones y la altura del terreno de Sánchez y Batista (2005: Tabla 1), quienes refieren que

terrenos que se encuentran por debajo de los 160 msnm, son más vulnerables a inundarse como producto de fuertes precipitaciones.

De acuerdo a la información presentada en los apartados de Precipitación e incidencia de huracanes y Geomorfología e hidrografía, es conveniente destacar la forma de embudo de la cuenca, con un amplia área de captación de lluvia y una reducida salida de agua hacia el mar; lo cual cobra importancia si consideramos que la llanura aluvial se encuentra limitada por sierras en donde se registran las mayores precipitaciones (Figura 3) y que al estar integradas por rocas volcánicas impermeables y presentar pendientes de pronunciadas a moderadas, condicionan durante lluvias intensas una respuesta rápida de escorrentía hacia la llanura aluvial. En donde aún con el predominio de depósitos Cuaternarios permeables y coeficiente de escurrimiento bajo, los escurrimientos torrenciales provenientes de las sierras, generan un aumento en el caudal y velocidad de la corriente hacia la parte baja de la cuenca,

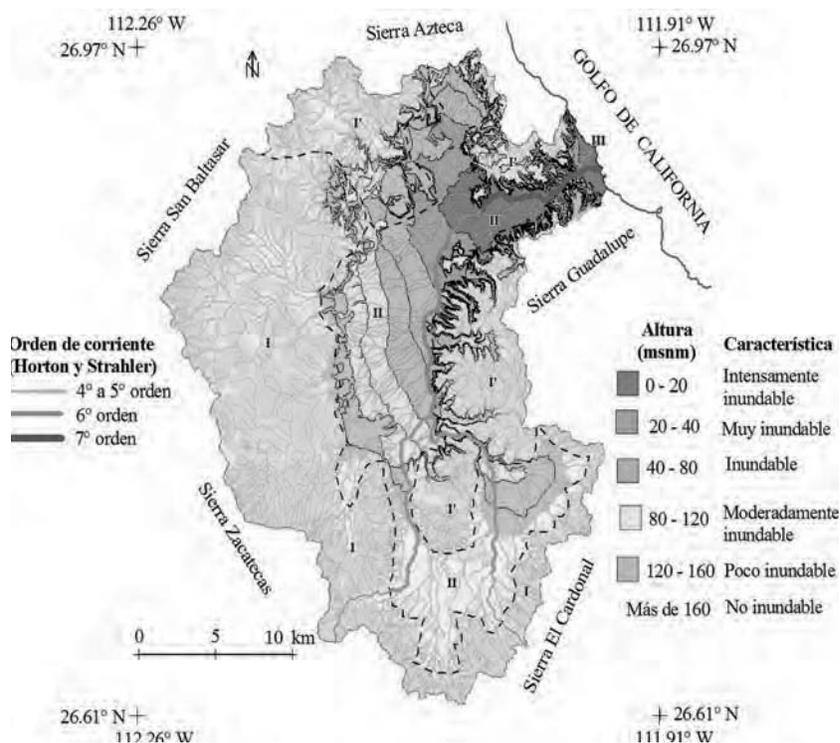


Figura 8. Geomorfología y vulnerabilidad a inundaciones en la cuenca de Mulegé, según la altura sobre el nivel del mar (Sánchez y Batista, 2005).



ocasionando que esta supere la velocidad de filtración de agua al subsuelo. Por lo que el relieve topográfico pasa a ser un aspecto relacionado con la intensidad de inundación; que de acuerdo a la relación entre inundaciones y la altura del terreno de Sánchez y Batista (2005), podemos referir que prácticamente toda la unidad geomorfológica de llanura aluvial (II), presenta algún rango de vulnerabilidad a inundación (Figura 8). Así que el tramo del arroyo conocido como El Cardonal de cuarto y quinto orden (Figura 6), atraviesa el área de los polígonos de poco a moderadamente inundable (160 - 80 msnm), posterior a este, el tramo del arroyo conocido como El Potrero de sexto orden atraviesa el área de los polígonos con un rango de medianamente a muy inundable (120 - 20 msnm) y por último el tramo de séptimo orden conocido como arroyo Mulegé atraviesa el área considerada como intensamente inundable (20 - 0 msnm). En esta porción de la cuenca además de presentar el relieve más bajo, se suma la barrera arenosa que mantiene parcialmente cerrada la desembocadura, que

si bien durante lluvias intensas tiende a romperse por efecto de la corriente torrencial que desciende desde el interior de la cuenca, también produce un retardo en la salida de agua hacia el mar, incrementando la vulnerabilidad a inundaciones.

De acuerdo a lo anterior podemos expresar que los aspectos geomorfológicos de la cuenca de Mulegé, son un factor que de manera natural durante lluvias intensas condicionan el riesgo a inundaciones súbitas y principalmente en su área de bajo relieve topográfico, lo cual es consistente con el Atlas de Riesgos y Peligros Naturales del Municipio de Mulegé (2011), en donde se reporta como área de alto riesgo a inundaciones (Figura 1).

Incremento del área urbana y su efecto en la geomorfología de la parte baja de la cuenca

Un aspecto que ha caracterizado el devenir histórico del poblado de Mulegé, ha sido la fluctuación de su población; incentivada al aumento por la actividad minera (cobre y manganeso), agricultura y pesca, y a su reducción por los efectos económicos negativos causados por diferentes episodios históricos y las recurrentes inundaciones, que han ocasionado pérdidas de cultivos, infraestructura y viviendas, llegando incluso a adquirir dimensiones de desastre. Sin embargo desde la década de los años setenta del siglo pasado, con la actividad turística y comercial la población aumentó entre los años de 1978 al 2015 de 4000 a 4398 habitantes (Gobierno del Estado de Baja California Sur, 2015), lo cual ha propiciado la demanda de espacio para viviendas.

En la Figura 9, se muestra el incremento del área urbana, el cual se ha dado en su mayor parte en las márgenes del estero Mulegé y las faldas de las sierras Azteca y Guadalupe, que por sus pendientes moderadas representan zonas de difícil construcción y al mismo tiempo forman una cañada que corresponde a la parte más estrecha y desembocadura de la cuenca. Por lo que en este contexto el efecto que tiene el poblado al incorporarse como parte del paisaje cobra

importancia desde el punto de vista geomorfológico, al visualizar el incremento del área urbana como pérdida de área de escurrimiento (Figura 10).

Para destacar el efecto que ha tenido el incremento del área urbana en la geomorfología de la cuenca, en la Figura 9 se sobrepone en color azul la zona que de acuerdo a la relación entre inundaciones y la altura del terreno (Figura 8), corresponde a la intensamente inundable (0- 20 msnm), limitándola en un polígono de 8.7 km² donde queda ubicada la mayor parte del poblado de Mulegé y cuya área asumimos como el

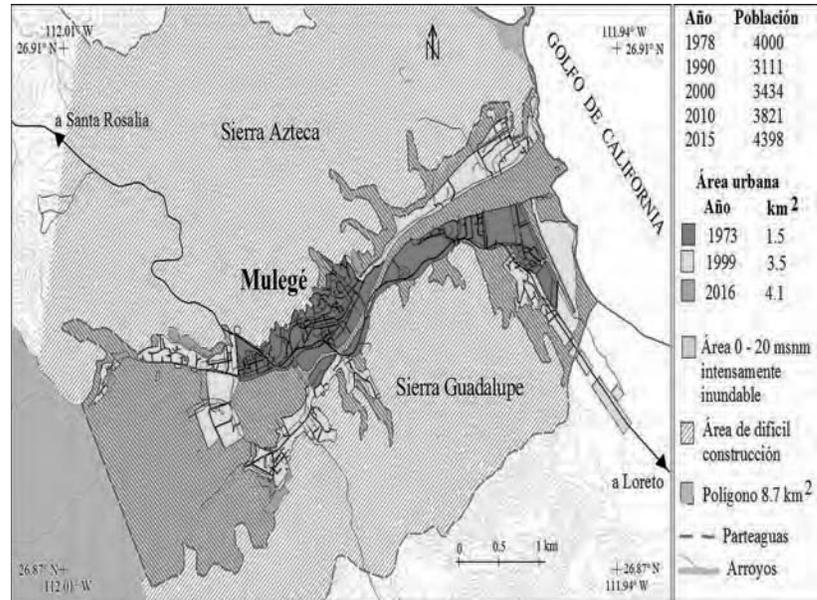


Figura 9. Aumento poblacional e incremento del área urbana en el poblado de Mulegé.

área de escurrimiento efectivo de la parte baja de la llanura aluvial en condiciones prístinas; de tal manera que para el año de 1973 el incremento del área urbana de 1.5 km², representaba una pérdida

de área de escurrimiento de 17 %, para el año de 1999 del 40.2 % y para el 2016 de 47.1 %.

Consecuentemente el incremento del área urbana en esta zona ha reducido el área natural de escurrimiento en donde al mismo tiempo y a falta de drenaje pluvial, ante eventos de lluvias intensas la segmentación en parcelas limitadas por calles, se convierten en una intrincada red de drenaje fluvial y las casas y edificaciones actúan como diques, retardando el flujo y la salida de agua de la cuenca.

Así el incremento del área urbana vista como pérdida de área de escurrimiento cobra importancia y se suma, a las características intrínsecas de la

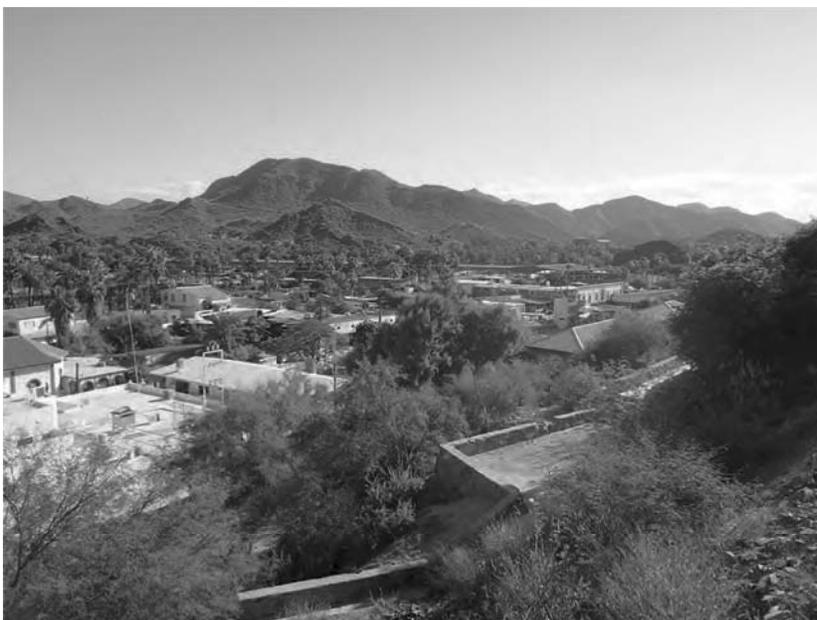


Figura 10. Panorámica de la parte baja de la cuenca en donde se ubica el poblado de Mulegé.

cuenca (forma, relieve topográfico, pendientes, litología, red fluvial), como factor de riesgo inducido, aumentando la vulnerabilidad e intensidad de inundaciones en la parte baja de la cuenca; pasando el riesgo de inundaciones a ser la suma de los procesos naturales (climáticos, geomorfológicos, hidrológicos) interactuando con los de la actividad humana.

De acuerdo a la información presentada, para validar el mapa de Geomorfología y vulnerabilidad a inundaciones (Figura 8), se presenta en la Figura 11, el modelo de inundación fluvial para un periodo de retorno (T_r) de 100 años.

Es conveniente destacar que los resultados del modelaje para los escenarios de inundación fluvial de los periodos de retorno de 2, 5, 25, 50, 200, 500 y 1000 años vistos en planta, son muy similares al de 100 años, por lo que para destacar las diferencias de los tirantes de agua generados en los periodos de retorno analizados se emplea de la Figura 11 la sección A – A', cuyos perfiles se muestran en la Figura 12 y su información se resume en la Tabla 4, de igual manera cabe mencionar que el tirante de agua y velocidad que se muestra en los perfiles de la Figura 12 varían a lo largo del cauce.

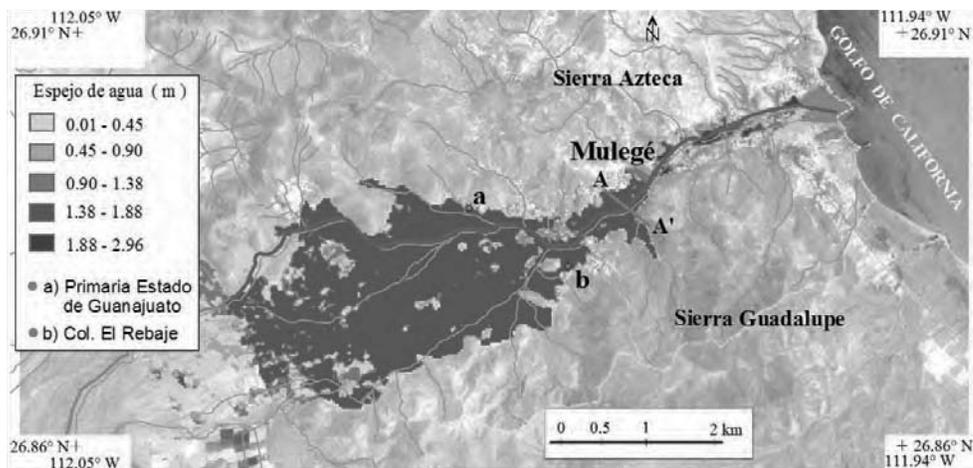


Figura 11. Modelo de inundación fluvial en la parte baja de la cuenca de Mulegé, para un periodo de retorno de 100 años (imagen pancromática SPOT E558/296; año 2010).

La precipitación calculada, para el periodo de retorno de 100 años fue de 300 mm/24 h, equivalente a la registrada en la estación meteorológica Mulegé, durante el huracán Jimena en el año 2009 (Tabla 3). A dicho huracán los pobladores hacen referencia como el que más daños y pérdidas materiales ha causado; puesto que el espejo de agua supero los 2.5 m de altura (Figura 13), lo cual es consistente con el tirante de agua máximo calculado en el programa HEC-RAS de 2.96 m (Figura 10), y que en la sección A – A' perfil "f" de la Figura 11, señala un tirante de agua de 1.70 m en esa sección del arroyo.

De igual manera se destaca la precipitación registrada durante el huracán Odile en el año 2014 de 184 mm (tabla 3), la cual es similar a la calculada para un periodo de retorno de 25 años (190 mm/24h), y cuyo tirante

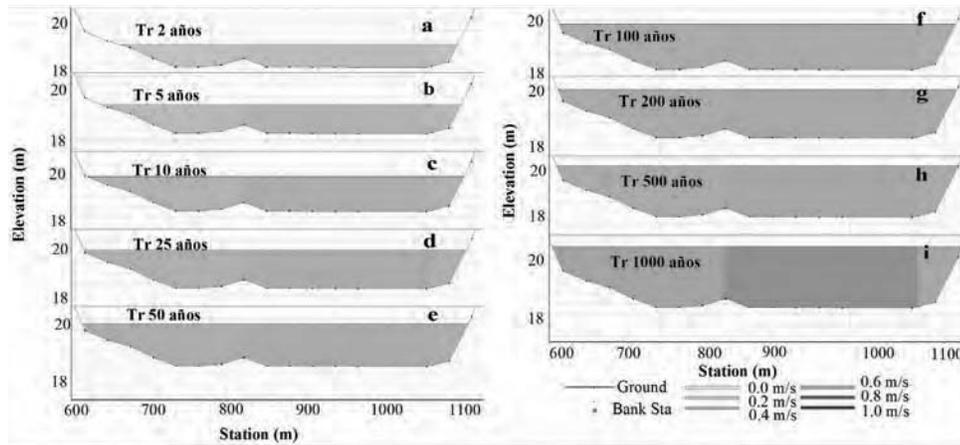


Figura 12. Perfiles de la sección A – A' (2811.481 programa HEC-RAS), para los escenarios de inundación fluvial de los periodos de retorno de 2, 5,10, 25, 50,100, 200, 500 y 1000 años; su ubicación en planta se muestra en la Figura 11. En el eje de las abscisas se indica la amplitud del cauce y en el de las ordenadas el tirante de agua que desborda del cauce del arroyo hacia su valle aluvial. Los colores indican la distribución de velocidad del agua. Se indican las máximas velocidades con las tonalidades más intensas.



Figura 13. Aspectos de la inundación causada por el huracán Jimena en el 2009 (Fotografías proporcionadas por el Sr. J. A. Aguiar Peña).



Figura 14. Mediciones del tirante de agua alcanzado en la inundación causada al paso del huracán Odile en el año 2014, a) dentro de la escuela primaria Estado de Guanajuato ubicada en la colonia La Calera, b) vivienda en la colonia El Rebaje; sus ubicaciones se muestran en la Figura 11



de agua máximo calculado fue de 2.75 m, consistente con la información proporcionada por los pobladores y mediciones hechas en campo (Figura 14), cuyo tirante de agua en la sección A –A' perfil “d” de la Figura 12, señala un tirante de agua de 1.46 m en esa sección del arroyo (Tabla 4).

Tabla 4. Resumen del modelaje para los escenarios de inundación fluvial en la sección A – A'; su ubicación en planta se muestra en la Figura 11 y los perfiles en la Figura 12.

Periodo de retorno (Tr)	Precipitación (mm)	Tirante de agua (m)	Vel. de caudal (m/s)
2	50	0.85	0.2
5	110	1.07	0.4
10	160	1.30	0.4
25	190	1.46	0.4
50	250	1.61	0.6
100	300	1.70	0.6
200	340	1.77	0.6
500	390	1.92	0.8
1000	430	2.31	1.0

La información del modelaje de escenarios de inundación fluvial para los periodos de retorno analizados es consistente con el mapa de geomorfología y vulnerabilidad a inundaciones (Figura 8). Por lo que de acuerdo a la información del modelaje que se resume en la Tabla 4, podemos afirmar que el poblado de Mulegé se encuentra expuesto a un riesgo crítico a inundaciones súbitas.

Consideraciones finales

Consideraciones finales

En el apartado de Precipitación e incidencia de huracanes, se hizo notar que los fenómenos meteorológicos antes de alcanzar la región donde se ubica la cuenca de Mulegé, primero afectan las regiones al sur, en cuyas localidades las inundaciones no son tan recurrentes como lo son en el poblado de Mulegé; en donde las inundaciones son generadas inicialmente por los aspectos geomorfológicos e hidrográficos de la cuenca que durante eventos de lluvias intensas, condicionan una vulnerabilidad natural a inundaciones, la cual se ha visto aumentada por la pérdida de área de escurrimiento, como efecto del incremento del área urbana, con poca o nula planificación y ordenamiento; ejemplificado con el aumento de asentamientos humanos en la rivera del arroyo Mulegé, catalogada como de alto riesgo a inundaciones. Situación que ha contribuido a que los habitantes del poblado generen la percepción de que las inundaciones son más frecuentes e intensas.

Es evidente que por la ubicación geográfica de Mulegé, no se pueda eliminar el riesgo a inundaciones, pero si reducir sus efectos, planificando el incremento de la mancha urbana. Para lo cual es fundamental el diagnostico cualitativo que brinda el análisis geomorfológico e hidrográfico como factores de riesgo, así como

el análisis cuantitativo, mediante modelaje de escenarios de inundación fluvial para diferentes periodos de retorno; imprescindibles en la gestión del riesgo y en el proceso de toma de decisiones de los gobiernos, frente a la incertidumbre que genera la condición aleatoria de los fenómenos meteorológicos y evitar que el riesgo a inundaciones llegue alcanzar dimensiones de desastre.

Agradecimientos

Agradecimientos

Los autores agradecen al DG Adriana Landa-Blanco por el diseño gráfico, a Allison Marie y a la M. en C. Diana Dorantes por la edición del Abstract.

Referencias

Referencias

- Casarrubias-Unzueta, Z., Gómez-López, U., 1994, Geología y Evaluación Geotérmica de la Zona Bahía Concepción, B.C.S., México: Revista Mexicana de Geotermia, 10(3), 75-88.
- Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). 2004. *Inundaciones*. Secretaría de Gobernación, Serie fascículos. México, D. F. 53 pp.
- Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). 2013. *Guía de contenido mínimo para la elaboración de atlas estatales y municipales de peligros y riesgos versión 2013*. Dirección de Análisis y Gestión de Riesgos, CENAPRED. México. D.F. 101 pp.
- Chávez-López, S., E. Avilés - Canett. 2017. *Diagnostico y escenarios de peligro por inundación fluvial en Ciudad Insurgentes, Baja California Sur, México*. Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes. 25(72): 62-74.
- CLICOM. 2015. *Base de datos climatológica nacional*. Datos climáticos diarios del CLICOM del SMN a través de su plataforma web del CICESE. En: <<http://clicom-mex.cicese.mx>> (Consultado el 8 de agosto de 2016).
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2015. *Atlas del agua en México 2015*. En: <<http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/ATLAS2015.pdf>> (consultado el 6 de marzo de 2016).
- Consejo de Recursos Minerales (CRM), 1997, Carta Geológica-Minera Loreto G12-5 Baja California Sur, escala 1:250,000: Pachuca, México, 1 mapa.
- Consejo de Recursos Minerales (CRM). 1999. *Monografía geológica-minera del estado de Baja California Sur*. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, Coordinación General de Minería. Pachuca, México. 237 pp.
- Cota-Sandoval, J. A. 2005. *Mulegé Misión y Pueblo Orgullo de Sudcalifornidad*. Gobierno del Estado de Baja California Sur. La Paz Baja California Sur, México. 132 pp.
- Gobierno del Estado de Baja California Sur. 2015. *Baja California Sur Información Estratégica*. Secretaría de Promoción y Desarrollo, Económico En: <<http://www.spyde.bcs.gob.mx/files/die/2015/EstrategicoBCSJulio2015.pdf>>



(consultado el 5 de septiembre de 2016).

Gutiérrez- Elorza, M. 2008. *Geomorfología*. Prentice Hall. Madrid. 898 pp.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 1996. *Estudio hidrológico del estado de Baja California Sur*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Aguascalientes, México. 205 pp.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2016. *Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas SIATL*. En: <http://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/siatl/#> (consultado el 15 de agosto de 2016).

Latorre, C., L. Penilla. 1988. *Influencia de los ciclones en la precipitación de Baja California Sur*. *Atmósfera*. 1(2): 99-111.

Lugo-Hubp, J. 1986. *Los métodos geomorfológicos*. *Revista de Geografía del Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática*. 1(1): 13-26.

Ramos-Radilla, V. 2006. *Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos, Fenómenos hidrometeorológicos*. Secretaría de Gobernación. México. D.F. En: <<http://www.proteccioncivil.gob.mx/work/models/ProteccionCivil/Resource/375/1/images/fh.pdf>> (consultado el 2 de marzo de 2016).

Salas-Salinas, M. A. 2011. *Metodología para la elaboración de mapas de riesgo por inundaciones en zonas urbanas*. Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), Serie Atlas Nacionales de Riesgos, fenómenos hidrometeorológicos. En: <<http://www.cenapred.gob.mx/es/Publicaciones/archivos/203.pdf>> (consultado el 2 de marzo de 2016).

Sánchez-Celda, M., J. L. Batista-Silva. 2005. *Evaluación del peligro y vulnerabilidad ante la ocurrencia de inundaciones. Cuenca del Cauto. Cuba*. *Mapping*. 102: 88-94.

Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL). 2011. *Atlas de riesgos y peligros naturales del municipio de Mulegé, Baja California Sur*. Gobierno Federal. México. D.F. 60 pp.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 1998. *Mapa de suelos dominantes de la República Mexicana, escala 1:4000000*. Catálogo de metadatos geográficos. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, 1 mapa. En: <http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/edafo4mgw.xml?_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc_html.xsl&_indent=no> (consultado el 12 febrero de 2016).

Servicio Meteorológico Nacional (SMN). 2009. *Eric III Versión. 2.0*. Banco de datos historico nacional del Servicio Meteorológico Nacional, programa informático (cd-rom). México.

Unisys Weather. 2016. *Hurricane Data*. Unisys Weather, USA, National Climatic Data Center. En: <<http://weather.unisys.com/>> (consultado el 12 de agosto de 2016).

Yee-Lizardi, H. 1986. *Mulegé 1705-1986 Ayer y Hoy*. Gobierno del Estado de Baja California Sur. La Paz Baja California Sur, México. 262 pp.

Cita de este artículo

Cita de este artículo:

Chávez López S. y A. Navarro Mendoza. 2018. Geomorfología como factor de riesgo a inundaciones en la cuenca hidrográfica de Mulegé, Baja California Sur, México. Recursos Naturales y Sociedad, 2018. Vol. 4 (2): 31-51. <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2018.04.04.02.0003>

Sometido: 17 de Agosto de 2018

Revisado: 16 de Septiembre de 2018

Aceptado: 06 de Noviembre de 2018

Editor asociado: M. en C. Sergio Pedrín Avilés

Idioma Inglés Abstract: Ms.C. Diana Dorantes

Diseño gráfico editorial: Lic. Adriana Landa-Blanco y Lic. Gerardo Hernández