

Planteamiento del problema y propuesta de soluciones para abordar el desafío de la gestión de las aguas lluvias en el área metropolitana de San Salvador (AMSS), El Salvador

Problem statement and solution proposal to address the challenge of storm water management in the metropolitan area of San Salvador (AMSS), El Salvador

Pablo Gómez Blanco^{1*}, Luis Fernández Martínez¹, Enrique Manuel Flores²,
Oscar Eduardo Hernández²

Recibido: 23/05/2019

Aceptado: 14/08/2019

*Autor de correspondencia

Resumen

Existen diversos eventos de precipitación que han causado daños importantes derivados de la ocupación del territorio y la falta de espacio para el agua dentro del Área Metropolitana de San Salvador (AMSS). Sin embargo, a pesar de no ser relevante en cuanto a la variable precipitación acumulada, el 3 de julio de 2008, sucedió un desgraciado incidente que cambió el ritmo de los acontecimientos y desencadenó la puesta en marcha de medidas para reducir los problemas derivados de la peligrosidad por inundación, fallecieron 30 personas de una misma congregación religiosa que viajaban dentro de un autobús camino a casa en la Calle Montserrat a la altura de la Colonia La Málaga en San Salvador. A partir de dicho instante, el problema trascendió al ámbito político y se desarrollaron varios estudios y construcciones encaminados a minimizar los efectos de las inundaciones fluviales en el AMSS. El presente artículo establece el desarrollo de lagunas de laminación y SUDS como la propuesta para paliar los efectos de las inundaciones fluviales en el ámbito urbano y presenta criterios: económico-financieros, socio-políticos, ambientales e hidrológico-hidráulicos; para acotar la tipología y ubicación de las mismas. La evaluación conjunta de los diversos criterios permite establecer un criterio de priorización de medidas válido para la elaboración de futuros planes maestros de gestión de aguas lluvias. Basándose en estos criterios se planteó la construcción de un sistema compuesto por tres reservorios de retención para minimizar los efectos de las inundaciones en el ámbito del Arenal de Montserrat una de las cuencas con mayores problemas en la gestión de aguas lluvias dentro del AMSS. En este contexto, se justifica la necesidad de contar con una planificación maestra para el desarrollo de soluciones encaminadas a resolver tanto los problemas derivados del drenaje fluvial como del pluvial en los sistemas tradicionales de alcantarillado – por ser el destino de éstos los cauces del AMSS y por contar con numerosos problemas por la falta de capacidad y mantenimiento de los mismos.

Palabras clave: lagunas de laminación, inundaciones, Plan Maestro de aguas lluvias.

Abstract

Many heavy rainfall events have caused severe damaged related with occupation of the territory and lack of space for water paths inside the Metropolitan Area of San Salvador (MASS). However, despite not being relevant in terms of accumulated rainfall, the 3rd of July of 2008, an unfortunate incident happened that changed the pace of events and triggered the settlement of measures aimed to reduce the flood hazard problems. 30 people from the same religious congregation that travelled back home in the same bus passed away in Montserrat street next to Colonia La Málaga in San Salvador. From this moment, the problem transcended to the political sphere and different technical studies and constructions were carried out in order to minimize the effects of river floods in the MASS. This article establishes the development of detention ponds and SUDS as the proposal to cope the effects of river floods in the urban area, as long as presents criteria: economic-financial, socio-political, environmental and hydrologic-hydraulic; in order to define their typology and location. The multi-criteria evaluation purposed establishes a criterion for prioritizing valid measures for the elaboration of future rainwater management master plans. Based in those criteria, the construction of a storm water detention system of three reservoirs to minimize the flood effects in the Arenal de Montserrat influence area – one of the watersheds with greater difficulties in the storm water management within the MASS. In this context, the need of a storm water Master Plan is justified in order to find solutions to solve the drainage capacity either form rivers and sewerage – because their spillage ends in the MASS rivers and they present uncountable problems of capacity and lack of maintenance.

Keywords: detention ponds, floods, storm water Master Plan.

1 Vielca Ingenieros, S.A. El Salvador. pablo.b@vielca.com; luis.f@vielca.com

2 Viceministerio de Vivienda y Desarrollo Urbano, El Salvador. enrique.flores@mop.gob.sv; oscar.hernandez@mop.gob.sv

1. INTRODUCCIÓN

A lo largo de la primera década del siglo XXI, se puso de manifiesto la debilidad de El Salvador ante los fenómenos naturales y la vulnerabilidad frente a los posibles efectos del cambio climático. Agencias especializadas llegaron al punto de ubicarlo como el país más vulnerable de Centro América (CEPAL, 2011), país más vulnerable del mundo (UNDAC, 2010), y primer lugar en el índice de cambio climático (Harmeling, 2010), que coinciden en que el 89% del territorio nacional y el 95% de su población estarían en riesgo de afección.

La vulnerabilidad expresada por dichas agencias estaba fundamentada en parte por la sucesión de fenómenos extremos de precipitación y la generación de escorrentías que provocaron inundaciones. Concretamente, posterior al huracán Stan del 2005, en solo dos años el país fue golpeado por cinco eventos climáticos extremos: las tormentas tropicales Ida en 2009; Agatha, Alex y Mathew en 2010, y la depresión tropical 12E (DT12E) en 2011.

Sin embargo, fue un evento convencional y de escasa magnitud el que en julio de 2008 sacudió a la sociedad salvadoreña y propició la adopción de medidas por parte de los tomadores de decisiones. Un autobús perteneciente a una iglesia local fue alcanzado por un desbordamiento de las aguas en el entorno de la Colonia La Málaga, en el Arenal de Monserrat, con 31 personas a bordo, perdiendo la vida todas ellas a excepción de un pasajero. El impacto social de esta noticia, demandó elevar el diálogo al ámbito político y arrancar el compromiso de obtener financiamiento y finalizar los estudios que ya se estaban desarrollando, para convertir las propuestas en medidas encaminadas a la resolución de esta problemática (figura 1).

Con objeto de resolver los problemas derivados de las inundaciones en el AMSS, Gobierno y Empresa Privada promovieron estudios científicos de las cuencas hidrográficas del área metropolitana, orientados a identificar y caracterizar sus elementos importantes e.g. usos del suelo (Planes Directores de OPAMSS), hidrografía ríos y quebradas (delimitadas por el MARN), inventario de obras de paso (CES-CLASS, 2000; CCAS, 2010), catastro de

infraestructuras de drenaje (Lotti y Associatti, 2002; Inypsa, 2018), etc., así como a la realización de diagnósticos (Huet y Mena, 1999; Lotti y Associatti, 2002; BID, 2016), planes directores (SWECO, 2003) y propuestas concretas de diseño. Sin embargo, ninguno de los estudios específicos ni planes directores consiguió financiación para llevar a cabo las obras que en ellos se definían.

En este contexto, el Gobierno de la República de El Salvador y el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) firmaron un préstamo para la ejecución del Programa de Reducción de Vulnerabilidad de Asentamientos Urbanos Precarios en el Área Metropolitana de San Salvador programando ejecutar entre los años 2013-2018, por un monto de 50 millones de USD cuyo objetivo general era reducir la vulnerabilidad y mejorar las condiciones de vida de familias que viven en Asentamientos Urbanos Precarios (AUP), expuestas a riesgos de inundaciones y deslizamientos en el Área Metropolitana de San Salvador (AMSS).

El programa financiaría tres componentes: (i) Reducción de vulnerabilidad en AUP a través de construcción de lagunas de laminación y reparación de bóvedas en el AMSS; (ii) Mejoramiento integral y mitigación de riesgos de AUP en el AMSS; y (iii) Fortalecimiento institucional del sector.

Dentro del primer componente se desarrollaron los proyectos de obras de amortiguamiento del macrodrenaje pluvial en el AMSS (Vielca, 2017), en el que se partió del análisis de once posibles ubicaciones para finalmente proponer el desarrollo, en una primera etapa, de la laguna de Colonia Luz; cumplimentada con el desarrollo posterior, de dos lagunas de laminación en el sitio conocido como El Piro. Entre los objetivos del presente trabajo se encuentra la modelación hidrológico-hidráulica de la cuenca del Arenal de Monserrat para la evaluación y el diseño de lagunas de laminación como elementos encargados de amortiguar los caudales pico de las avenidas extremas; así como la integración de sus resultados en un análisis multicriterio en donde adicionalmente se consideren factores económico-financieros, socio-políticos y ambientales para la priorización de acciones y toma de decisiones.



Figura 1. Cuenca alta del Arenal de Montserrat y ubicación de la zona de La Málaga

2. METODOLOGÍA

El AMSS se encuentra enclavado entre las faldas del volcán de San Salvador y la cordillera del Bálsamo, ocupando en su mayoría la cabecera de cuenca del río Acelhuate. Las inundaciones que sufren las comunidades aledañas a los cauces son cada vez más recurrentes y se deben a diversos factores (Fernández-Lavado, 2010):

- Fisiografía de los cauces e intensidad de precipitación. Se trata de la transición entre el curso alto y medio de una quebrada; con flujo discontinuo; fuertes pendientes en cabecera y cauces bien definidos frente a la aparición de diversas terrazas fluviales, concordantes con las respuestas de los cursos fluviales a las inundaciones históricas, y cursos meandriiformes en el fondo del valle.
- Es en esta zona i.e. el fondo del valle donde se establece y asienta la ciudad, presentando un crecimiento falto de ordenación territorial, hasta que se constituye la Oficina de Planificación del Área Metropolitana de San Salvador (OPAMSS).
- Crecimiento urbano, como motivo de la impermeabilización de la cuenca y del aumento de la exposición de la población a la peligrosidad por inundación.
- Invasión de los cauces, por la proliferación de infraestructuras y, sobretudo, la aparición de asentamientos urbanos precarios, que tienden a ocupar terrenos destinados al

trasiego de caudales en tiempo de avenidas extremas.

- Consideración del cambio climático y la variabilidad climática, a través de las conclusiones alcanzadas en MARN (2018) en lo relativo al comportamiento de la variable precipitación, en términos de distribución mensual de la misma, la disminución en términos globales de su acumulado anual y la tendencia a aumentarse la recurrencia de los eventos extremos y el aumento de las intensidades de precipitación.

Las lagunas de laminación constituyen una alternativa de solución a dicha problemática puesto que se encargan de retener parte del volumen del hidrograma durante las crecidas, reduciendo el pico y el impacto aguas abajo de la infraestructura (Tucci, 2007). Dentro de esta tipología de actuación se plantearon soluciones que careciesen de elementos de control de operación, tales como compuertas, equipos de bombeo, etc., de manera que la crecida es regulada por la capacidad del desagüe de fondo que está diseñado para que deje circular libremente los caudales ordinarios y su capacidad máxima de evacuación no cause daños a la población ribereña aguas abajo de la presa y las condiciones del vertedero superficial, debiendo ser capaces entre ambos elementos de aliviar el caudal de diseño sin producir afecciones a la población aguas arriba de la infraestructura (figura 2).



Figura 2. Vista virtual de la laguna de laminación de Colonia Luz

En Blanco y Vila (2018) se establecen los criterios de selección que se emplearon en los diseños de lagunas de laminación dentro de Vielca (2017), analizando distintos factores intrínsecos de las ubicaciones pre-establecidas que acaban condicionando el posible desarrollo de alternativas. En base a ello, los criterios a considerar pueden establecerse como sigue:

- Hidrológico-hidráulicos, a partir de la modelación hidrológica pseudo-distribuida de las cuencas de estudio en Hec-HMS se pueden seleccionar las zonas prioritarias de actuación, por ser las que producen mayor impacto sobre el territorio en cuanto a la problemática detectada y las necesidades de laminación de caudales. La determinación de caudales circulantes requiere del conocimiento de las siguientes variables de estado y parámetros:
- Precipitación, cuya definición se plantea tanto para eventos históricos como a partir del estudio de las series históricas de precipitación máxima en 24 h (figura 3).

Desde principios del S-XXI se cuenta con registros telemétricos automatizados de precipitación en algunas ubicaciones del AMSS, con lo que se puede realizar un análisis estadístico de dichas series 5-10-15 minutos para determinar qué eventos registrados superan un determinado umbral mediante la metodología

PoT (del inglés, *Peaks over Threshold*) – que defina, por ejemplo los 5 años de periodo de retorno. Al mismo tiempo, del estudio de estas series se pueden determinar las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) y Precipitación-Duración-Frecuencia (PDF) que acaban definiendo la relación existente entre la precipitación caída en una duración infra-diaria y la correspondiente a una duración de 24 h.

Por otro lado, desde principios de la década de 1970 se cuenta con registros de precipitación máxima diaria en diversas estaciones del país aunque algunas de ellas vieron interrumpidas sus mediciones en el período de guerra civil que terminó con la firma de los Tratados de Paz en 1992. Del análisis estadístico de estas series de precipitación, con mayores registros que los de las series telemétricas, se extraen las precipitaciones estadísticas asociadas a diversos periodos de retorno y duraciones (con ayuda de las relaciones establecidas en el análisis realizado con las series telemétricas).

- Hidromorfometría, determinada a partir del Modelo Digital de Elevaciones (MDE) proveniente de un vuelo LiDAR a escala nacional finalizado en el año 2014 y cuyo cálculo fue realizado con apoyo de Sistemas de Información Geográfica (GIS) (figura 4).



Figura 3. Resultados del estudio hidrometeorológico de precipitaciones, de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo: a) Curva precipitación-duración-frecuencia en la estación Boquerón; b) Curva intensidad-duración-frecuencia en la estación boquerón; c) relación existente entre las láminas de precipitación de 24 h en el AMSS y las obtenidas en Erazo (2008) a escala nacional; d) Construcción de hietograma de bloques alternos para un evento de 50 años de periodo de retorno y 90 min de duración en la estación Aeropuerto.

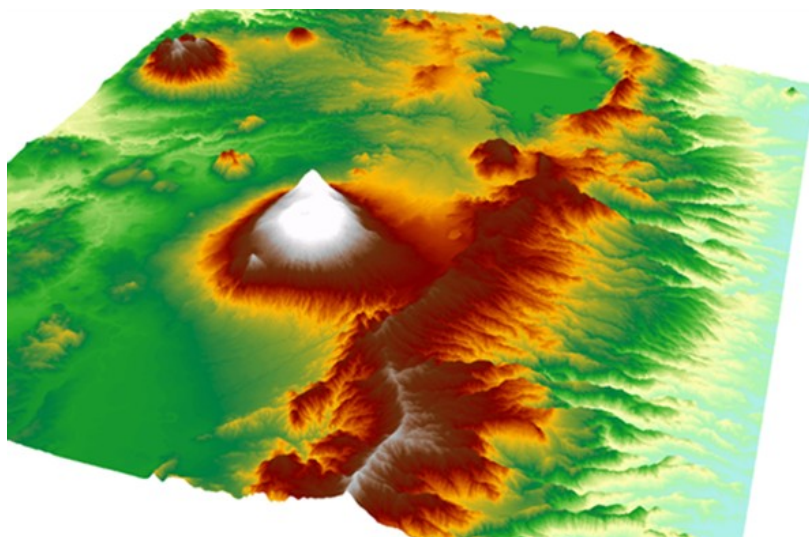


Figura 4. Levantamiento LiDAR empleado como MDE en la modelación hidrológica (Vielca, 2017)

En primer lugar, se procesa el MDE para buscar endorreísmos y generar una red capaz de evacuar las aguas desde los puntos con mayor elevación a los de menor cota por gravedad. A partir del MDE corregido en dichos términos se identifica

la red de drenaje y se determinan las cuencas de aporte de un determinado tamaño existentes dentro del ámbito de estudio. Ambos resultados permiten calcular los siguientes parámetros hidromorfométricos:

- Superficie de la cuenca, en m².
- Longitud de drenaje, en m, desde el punto con mayor tiempo de recorrido dentro de la cuenca hasta el desagüe de la misma.
- Elevación de los puntos de mayor tiempo de recorrido y del punto de desagüe de cada cuenca.
- Pendiente, en m/m, y tiempo de concentración de la cuenca, en min.
- Usos del suelo, considerando para el escenario actual y futuro (año 2030) los lineamientos definidos en el Esquema Director del AMSS (OPAMSS, 2016) y empleando la fotografía histórica e imágenes satelitales provenientes del proyecto LandSat 7 para la fotointerpretación y clasificación supervisada de usos del suelo, respectivamente.

Los usos del suelo se introducen en el modelo hidrológico a partir del parámetro Número de Curva (CN), que se emplea para su calibración y ajuste.

Existen varios estudios hidrológicos e.g. Bertoni y Catalini (2005), CCAS (2010), MARN (2012), BID (2016), entre otros que plantean escenarios equivalentes en el entorno del AMSS, obteniendo resultados muy distintos, por lo que resulta fundamental la calibración de los mismos para poder tener garantías de la bondad de los análisis realizados y de las conclusiones alcanzadas (figura 5).

Por otro lado, existen estaciones hidrométricas automatizadas que registran los niveles alcanzados en tres puntos de la cuenca del río Acelhuate i.e. El Piro, Belloso y Guazapa con valores cada 5-10-15 minutos, aunque cuentan con registros cortos y discontinuos en alguna época, lo que dificulta generalizar su análisis para la calibración de este tipo de modelos; además de bases de datos con registros de niveles alcanzados e.g. Desinventar. Desinventar es una base de datos con información sistemática sobre la ocurrencia de desastres cotidianos de pequeño y mediano impacto, entre los que se encuentran registros de precipitación e inundaciones. Sus resultados pueden consultarse en Desinventar (2019). MARN El Observatorio Ambiental del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales cuenta con un registro

histórico de inundaciones a nivel nacional con registros desde 1921 y que puede consultarse en SNET (2019), y otras como las de OPAMSS y DACGER, además de trabajos de campo post-evento, como Fernández-Lavado (2010) o archivos multimedia georreferenciados e.g. como lo ocurrido el 3 de julio de 2008 en la Calle Monserrat con el autobús de feligreses de la Iglesia Elim y que se puede ver en Youtube (2019) que permiten delinear la afección que una determinada tormenta tuvo sobre el territorio.

Todos estos registros han sido analizados con modelación hidráulica uni y bidimensional (con ayuda de Hec-RAS e IBER, respectivamente) para ajustar los caudales circulantes por los distintos tramos de cauce del AMSS asociados a los distintos eventos históricos seleccionados e.g. la figura 6. Modelación hidráulica en IBER para el evento STAN aguas abajo de Barrio La Vega (Vielca, 2017) muestra la calibración de la superficie de inundación que ocupó el evento STAN en 2005 en base a los resultados reportados por Fernández-Lavado (2010).

Con base en los resultados de la modelación hidrológica se realiza un estudio hidráulico que con ayuda de GIS permita cuantificar los daños por inundación ocasionados para cada evento sobre el territorio, pudiendo traducir los mismos en costes monetarios en función de la tipología de usos del suelo afectados y su valoración económica, así como los niveles alcanzados por el agua en cada punto.

La diferencia, en costes de daños ocasionados, existente entre la inundación producida para cada evento y la misma una vez adoptadas las medidas propuestas e.g. lagunas de laminación, mejora de los sistemas existentes, implantación de SUDS, etc., constituye el beneficio obtenido por la implantación de dichas medidas.

El referido beneficio puede compararse con el coste de los daños producidos, definiendo un criterio de priorización de actuaciones proveniente del análisis hidrológico-hidráulico.

- Económico-financieros, la falta de una ley nacional de aguas que salvaguarde el acceso al agua para toda la población y la protección de los cursos naturales condiciona el planteamiento de actuaciones en el ámbito del AMSS, puesto que gran parte del

territorio es de titularidad privada y su adquisición requeriría de desembolsos considerables o la gestión de expedientes de expropiación que dilatarían los tiempos de actuación.

Por ello resulta como condicionante el planteamiento de actuaciones en terrenos de titularidad pública (figura 6).

En otro orden de cosas, el Plan Maestro para la Gestión Sustentable de las Aguas Lluvias del

AMSS (PM-GESALAMSS) plantea una herramienta para la toma y priorización de decisiones a la hora de abordar medidas estructurales en busca de la reducción de la vulnerabilidad de la población frente a inundaciones.

La citada herramienta está fundamentada en la topología del sistema hidrológico y tiene en consideración los siguientes principios básicos:

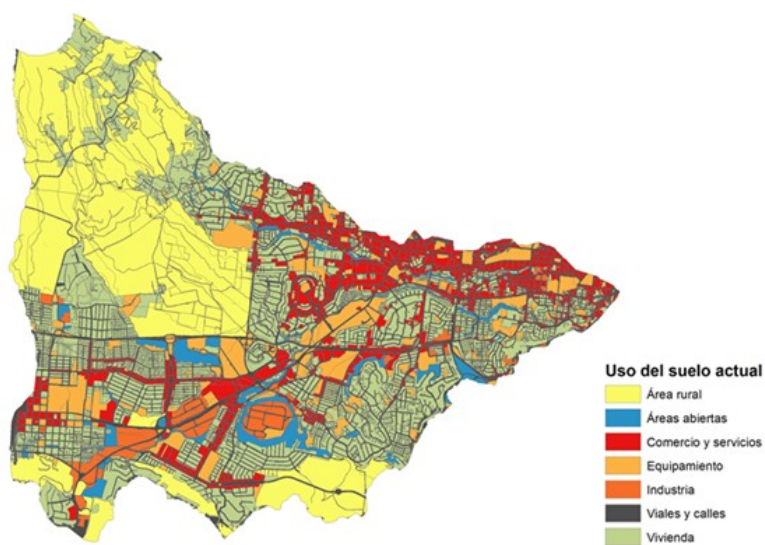


Figura 5. Usos del suelo empleados en la modelación de la cuenca del Arenal de Montserrat (adaptado de Vielca, 2017)

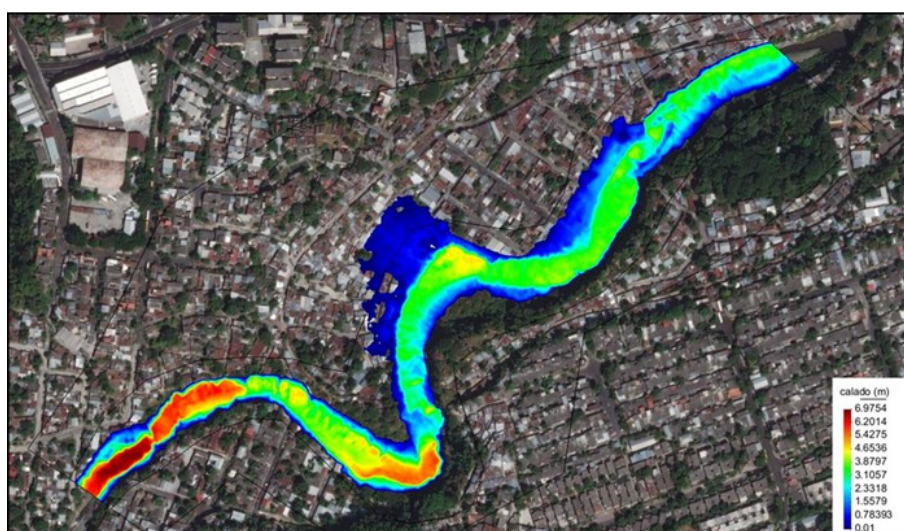


Figura 6. Modelación hidráulica en IBER para el evento STAN aguas abajo de Barrio La Vega (Vielca, 2017)

– Las medidas que se adoptan aguas arriba de un determinado punto son las responsables

de la reducción de la vulnerabilidad en el mismo.

- La contribución de cada medida adoptada es función del peso específico i.e. el volumen de laminación frente al volumen de laminación total aguas arriba de cada punto de la misma en cada punto del territorio.
- El beneficio obtenido medido como diferencia entre los daños ocasionados sin la adopción de medidas y tras la adopción de las mismas, en línea con lo señalado en los criterios hidrológico-hidráulicos es responsabilidad de cada una de ellas en función de su peso específico.

El criterio para la búsqueda de solución del problema es doble: por un lado, se puede perseguir la minimización de la relación costo/beneficio entendiendo el costo como el de construcción de las medidas estructurales y, por otro lado, se puede perseguir el maximizar el beneficio con una determinada cantidad de dinero.

La adopción de uno u otro planteamiento será función de si se cuenta con una financiación dependiente de aportaciones constantes o variables en función de determinadas tasas o gravámenes; o si se cuenta con una línea de inversión, provenientes del estado o de un organismo multilateral, para la construcción de medidas estructurales; respectivamente.

- Socio-políticos, en línea con la componente económico-financiera en cuanto a que la titularidad de los terrenos que colindan con los cauces es privada y dado que el AMSS presenta un fuerte crecimiento poblacional en parte por el crecimiento vegetativo del país, pero también debido a la migración interna desde el ámbito rural en busca de oportunidades laborales.

Ambos factores inciden en que las Comunidades con mayor escasez de recursos busquen residencia en terrenos vulnerables, tales como los próximos a vertederos de residuos, a terrenos con inestabilidad de taludes, peligrosidad por lahares o peligrosidad por inundación (Blanco y Vila, 2018).

Los cauces del AMSS presentan este tipo de asentamientos urbanos precarios (AUP) en los que se requiere de experiencia en manejo y gestión social para realizar cualquier tarea de

campo e.g. inspección del área, relevamientos topográficos, estudios de suelo y geotecnia, censos poblacionales, inventarios de fauna y biota, etc., lo cual dificulta en gran medida la viabilidad de las propuestas de ubicación de lagunas de laminación en sitios en los que la población de AUP sea elevada, más si cabe al considerar dentro de la propuesta la opción de reasentar a los miembros de las Comunidades afectadas.

- Ambientales, como complemento al resto de criterios y siguiendo los lineamientos de evaluación ambiental del MARN, se deben realizar estudios específicos de caracterización biológica e.g. flora, fauna, calidad de aguas, etc., y paisajística del medio que sirvan de línea base para la evaluación correspondiente.

Los criterios ambientales sirven adicionalmente para poner en valor y conservar algunas zonas verdes de la ciudad, además de condicionar los posibles emprendimientos de actuaciones a una serie de medidas protectoras y correctoras frente a los impactos negativos que pudieran producirse.

Estos criterios resultan ser la base para el análisis y la toma de decisiones en cuánto a ubicación y priorización de actuaciones de lagunas de laminación como respuesta al problema de inundaciones ribereñas en los cauces fluviales del AMSS, tal y como se establece en Vielca (2017) y se presenta en Blanco y Vila (2018).

Frente a esta visión limitada a la propuesta de lagunas de laminación para la resolución del problema de inundaciones, se plantea la necesidad de una planificación maestra en la gestión de aguas lluvias en el AMSS (PM-GESALAMSS), la cual está siendo financiada por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) y que está desarrollando Vielca Ingenieros, S.A. en la actualidad.

En ella, el planteamiento de medidas estructurales amplía su gama de actuaciones (más allá de la construcción de lagunas de laminación), incluyendo la actualización, reparación y mejora de los sistemas tradicionales que destacan por su falta de capacidad; así como la adopción de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) y la reforestación de espacios

naturales degradados. La priorización de las distintas tipologías de medidas estructurales propuestas, más allá de las lagunas de laminación propuestas en Vielca (2017), en base a un criterio que integre los resultados de la modelación hidrológico-hidráulica y un análisis costo/beneficio de las inversiones realizadas constituyen la base de innovación del presente estudio.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La selección por criterios hidrológico-hidráulicos fue aplicada al caso del diseño de lagunas de laminación en la cuenca del Arenal de Montserrat del AMSS (Vielca, 2017). Se estudió la implantación de reservorios en once ubicaciones distintas dentro de la cuenca, desarrollando a nivel de diseño final únicamente tres proyectos constructivos i.e. Colonia Luz (actualmente en construcción y con 210,000 m³ de capacidad de laminación), El Piro aguas arriba (con 215,000 m³ de capacidad) y El Piro aguas abajo (con 190,000 m³ de capacidad). En Vielca (2017) se evaluaron los resultados de laminación en tres puntos de control: CIFCO-MOP, Colonia La Málaga y Barrio La Vega.

Tras realizar el análisis multi-criterio establecido con anterioridad, se llegó a las siguientes conclusiones:

- Los sitios de El Triunfo y Suncita se encuentran dentro del parque del Bicentenario, que constituye una de las principales áreas medioambientalmente protegidas de la ciudad. Por otro lado, sus cuencas tributarias son pequeñas y se conservan próximas a su estado natural, lo que descarta adicionalmente su actuación por criterios hidrológico-hidráulicos.
- El sitio de La Mascota ocupa parte del parque Maquilishuat, donde existen diversas especies de flora y árboles de gran tamaño. Por otro lado, la adecuación de la parcela para la ubicación de un reservorio de detención requeriría de la realización de grandes desmontes, encareciendo los movimientos de tierra los costes de construcción. Ambos factores, junto con el criterio hidrológico-hidráulico, dado que su

capacidad de laminación sólo aportaría a la mejora del punto de control de Barrio La Vega, contribuyeron al descarte del sitio de actuación.

- Los sitios de Chapupo y Jardines de Guadalupe se encuentran en la subcuenca del Arenal de San Felipe, en donde se reportan escasos problemas de inundaciones; se dispone de poco volumen de almacenamiento; y el hidrograma de escorrentía se encuentra desacoplado del hidrograma de la cuenca del Arenal de Montserrat, lo que conlleva que cualquier actuación en el Arenal de San Felipe podrá servir para disminuir el volumen del hidrograma resultante pero no para reducir el caudal punta circulante en los puntos de control. Por todo lo anterior se descartaron las actuaciones previstas dentro de esta subcuenca.
- Los sitios de Buenos Aires 1 y 2, así como el sitio de Merliot son de titularidad privada y se encuentran ubicados en zonas con elevado potencial de desarrollo y valor económico. A pesar de que ambos sitios se encuentran en cabecera de la cuenca principal y tienen potencial para albergar lagunas mayores de 150,000 m³, los costes de adquisición de los terrenos hicieron inviable la propuesta.
- Finalmente se seleccionaron los sitios de El Piro 1 (aguas arriba) y 2 (aguas abajo) además del sitio de Colonia Luz, como los propuestos para el desarrollo de los estudios y diseños finales.

En ambos se llevaron a cabo trabajos de topografía y estudios de suelos y geotecnia, se elaboró un censo poblacional de familias afectadas y se generó la documentación técnica necesaria, incluyendo los preceptivos Estudios de Impacto Ambiental, para poder llevar a cabo las obras de construcción. Sin embargo, los sitios de El Piro cuentan en su área de desarrollo con el asentamiento de dos Comunidades, i.e. La Cuchilla y El Tanque, con más de 500 familias, lo que en términos socio-políticos impide el desarrollo de actuaciones hasta que no se plantee una solución habitacional complementaria al proyecto. En base a todo lo anterior se decidió llevar a cabo la construcción únicamente de la

laguna de Colonia Luz, que se encuentra inmediatamente aguas arriba de la Colonia La Málaga, dentro del cauce principal del Arenal de Montserrat y sin grandes afecciones socio-políticas y ambientales. Pero las propuestas de Vielca (2017) se limitaban al desarrollo de lagunas de laminación dentro del Arenal de Montserrat, mientras que los problemas de inundación se presentan en varios puntos del AMSS y no se limitan a las inundaciones ribereñas, sino que también existen problemas por falta de capacidad de los sistemas de drenaje pluvial (figura 7 y 8).

En este contexto se desarrolla el Plan Maestro para la Gestión Sustentable de Aguas Lluvias en

el AMSS (PM-GESALAMSS), proponiendo soluciones a los problemas relacionados con las aguas pluviales en todo el ámbito metropolitano. En la medida en que dichos problemas están relacionados con las inundaciones ribereñas, las lagunas de laminación tienen un papel relevante en su resolución. Sin embargo, existen problemas en este rubro que quedan alejados de los cauces principales y que además se presentan de manera más recurrente, tales como el corte de calles por la acumulación de agua en puntos bajos, el colapso de tuberías y bóvedas o el cierre de espacios públicos por problemas de inundaciones.



Figura 7. Universo con posible ubicación de embalses y puntos de evaluación de resultados (Blanco y Vila, 2018)



Figura 8. Problemas de falta de capacidad de las redes de drenaje pluvial secundario existentes (Protección Civil de El Salvador)

Muchos de estos problemas han sido identificados y existen estudios que documentan su problemática, con lo que el PM-GESALAMSS se limita a revisar la documentación disponible y realizar una evaluación hidrológico-hidráulica para la propuesta de soluciones. En cualquier caso, su problemática está asociada a la falta de cobertura y mantenimiento de las redes de drenaje pluvial secundario. Por ello se torna necesario evaluar el estado de dichos sistemas y realizar una propuesta holística de soluciones. En este sentido, dentro del PM-GESALAMSS se genera una base de datos completa que recopila los distintos catastros de redes de drenaje pluvial secundario realizados desde principios del S-XXI e.g. Lotti y Associatti (2002), Inypsa (2018), etc., unificando criterios de definición y corrigiendo las inconsistencias encontradas. A partir de la misma, con tratamiento en GIS de la información, se construyen modelos hidráulicos en EPA-SWMM para evaluar la capacidad de los sistemas y decretar los puntos y tramos faltos de capacidad y que en consecuencia son susceptibles de presentar problemas de flujo en superficie. Para resolver estos problemas, el PM-GESALAMSS establece soluciones consecuentes con la filosofía de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) que sean capaces de recoger los volúmenes excedentes y transferirlos de manera diferida a las redes al

tiempo que fomenten otros procesos como la infiltración o la biorretención de contaminantes – además de otros beneficios como la disminución de temperatura ambiente, la generación de infraestructura verde urbana o el aumento de las abstracciones iniciales en el proceso lluvia-escorrentía, entre otros (figura 9).

Tanto la propuesta de soluciones tipo SUDS como las lagunas de laminación pueden relacionarse a través del parámetro “capacidad (o volumen) de laminación” (en m³), pudiendo establecerse una relación de costes en función del mismo, i.e. USD/m³.

- La relación de costes establecidos para las medidas tipo SUDS oscila entre los 220 USD/m³ y los 1,100 USD/m³, en función de la capacidad de almacenamiento libre disponible, e.g. el índice de huecos si se trata de almacenamiento en medio poroso y las medidas de adecuación paisajística o mejoramiento urbano previstas.
- La relación de costes de las lagunas de laminación oscila entre los 70 USD/m³ y los 110 USD/m³, variando en función de las necesidades de impermeabilización y protección de los taludes del perímetro de embalse. Cabe destacar que se trata de embalses mayores a los 100,000 m³ de capacidad y con una altura de cerrada inferior a los 20 m.

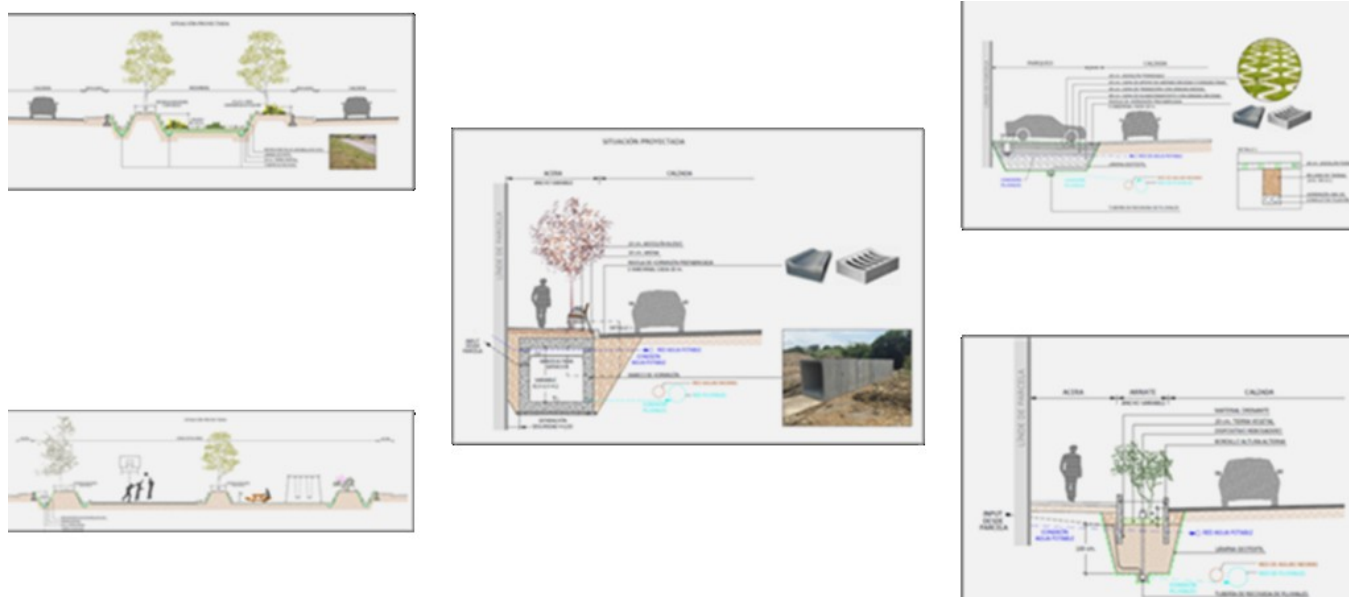


Figura 9. Propuesta de medidas tipo SUDS establecidas en el PM_GESALAMSS

Dicha relación se establece como parámetro de base en el análisis costo/beneficio del PM_GESALAMSS, aunque deba corregirse para considerar la mayor recurrencia de problemas en el ámbito de las redes de drenaje pluvial secundario y los beneficios adicionales asociados con la adopción de SUDS (figura 10).

El análisis costo/beneficio se aplica a las distintas medidas establecidas, quedando su beneficio definido en base a la topología de la red de cauces y el peso específico (relación entre volúmenes disponibles) que cada medida tiene

respecto de la capacidad de laminación aguas arriba de un determinado punto de la red.

En base a esta premisa se construyen las relaciones costo/beneficio para cada uno de los eventos de evaluación del PM_GESALAMSS, pudiendo comparar los resultados en función de la recurrencia de cada una de las tormentas de diseño.

El resultado es una propuesta de priorización de medidas financieramente sostenible que deberán desarrollarse a lo largo del periodo de implementación del Plan Maestro i.e. 20 años.

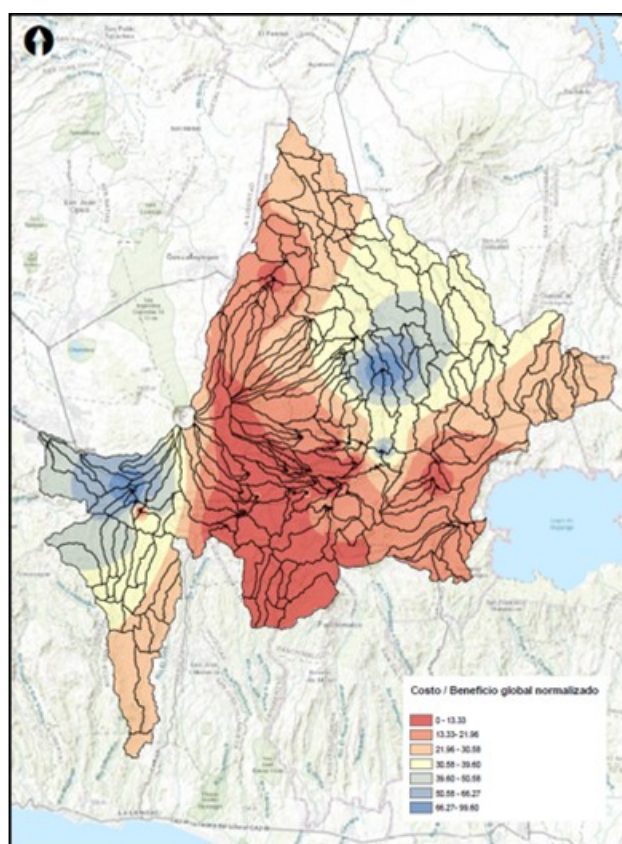


Figura 10. Relación costo/beneficio como criterio de priorización obtenida en el PM_GESALAMSS

4. CONCLUSIONES

El crecimiento urbano descontrolado del AMSS, que conlleva la ocupación e impermeabilización del territorio en la cabecera de cuenca del río Acelhuate, constituye el detonante fundamental de la problemática existente de peligrosidad de inundación. Adicionalmente, la migración interna experimentada desde el mundo rural al ámbito metropolitano en busca de oportunidades de mejora, desplaza a la población más

desfavorecida a ocupar, entre otros espacios degradados, los reservados para el drenaje fluvial (figura 11). En este contexto nace la necesidad de brindar soluciones al corto plazo que sean capaces de disminuir los caudales punta circulantes por los ríos y quebradas del AMSS, tales como las lagunas de laminación. El presente artículo presenta los criterios hidrológico-hidráulicos, económico-financieros, socio-políticos y ambientales desarrollados en

Vielca (2017), Blanco y Vila (2018) y en la elaboración del PM-GESALAMSS para la toma de decisiones y priorización de actuaciones encaminadas a la retención de aguas lluvias capaces de disminuir los caudales circulantes por los cauces del área de estudio. Dado que el ámbito y los problemas abordados en el PM-GESALAMSS son mayores que los definidos en Vielca (2017), se requiere la adopción de medidas complementarias a las lagunas de laminación que resuelvan problemas existentes en los sistemas tradicionales. Para ello se

propone el desarrollo de SUDS y se establece el parámetro “volumen de detención” (en USD/m³) de cada uno de los sistemas planteados, como base para la priorización de las medidas a desarrollar a través de un análisis costo/beneficio de alternativas. La laguna de laminación de Colonia Luz fue diseñada en Vielca (2017) y a la fecha de redacción del presente artículo está cerca de finalizar su etapa de construcción, siendo la primera en su especie en la región centroamericana.

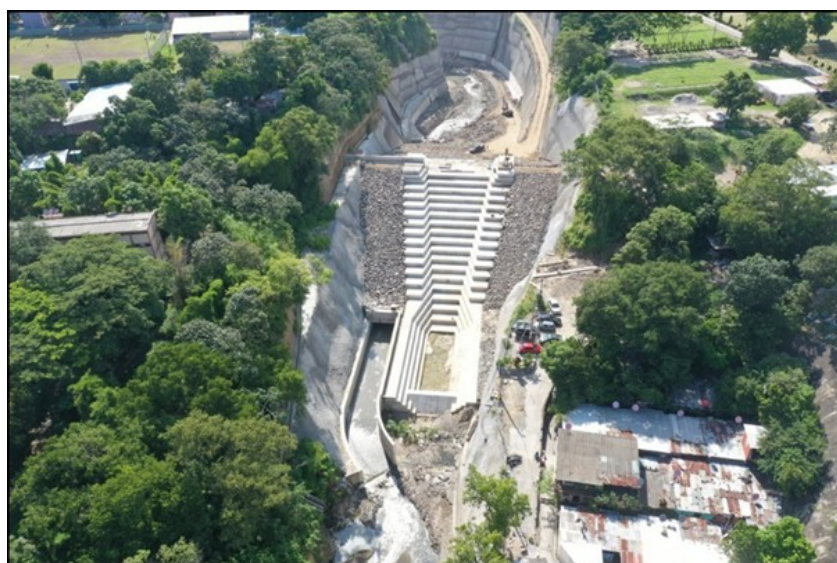


Figura 11. Estado actual de la laguna de laminación de Colonia Luz en San Salvador (vuelo dron de septiembre de 2019)

REFERENCIAS

- Bertoni, J., Catalini, C. (2005). *Diseño de cinco prototipos de sistemas de infiltración de aguas lluvias para el manejo de la escorrentía superficial en el AMSS*. Contrato de Servicios No. FORGAES-054-2005-SER. Oficina de Planificación del Área Metropolitana de San Salvador (OPAMSS). pp. 335
- BID, (2016). *Perfil de riesgo de desastre por inundaciones para El Salvador*. Banco Inter-americano de Desarrollo (BID). pp. 157
- Blanco P., Vila A. (2018). Proyecto de macrodrenaje de aguas pluviales en el Arenal de Monserrat, Área Metropolitana de San Salvador (El Salvador). *XI Jornadas Españolas de Presas (León, España)*. SPANCOLD Comité Nacional Español de Grandes Presas: 1347-55.
- CCAS, (2010). *Servicios de Consultoría para Apoyo en el Diagnóstico y la Elaboración de un Programa de Reducción de Vulnerabilidad en Quebradas y Ríos del AMSS*. Informe Final Componente hidrología e hidráulica_v3. Carrera Consulto-res Asociados, SA de CV. pp. 259
- CEPAL, (2011). *La economía del cambio climático en Centroamérica: Reporte técnico 2011*. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). pp. 437
- CES-CLASS, (2000). *Estudio de factibilidad y diseño final de ingeniería del proyecto “obras de paso del sistema hidrográfico del Área Metropolitana de San Salvador”*. Ministerio de Obras Públicas, Transporte, Vivienda y Desarrollo Urbano (MOPTVDU). pp. 171

- Desinventar, (2019). *Corporación OSSO/ La Red/ UNISDR*, Colombia. <https://www.desinventar.org/es/>, e-mail: desinventar@desinventar.org
- Fernández-Lavado, C. (2010). *Caracterización de la inundabilidad en el Área Metropolitana de San Salvador*. Programa IPGARAMSS-Geólogos del Mundo. pp. 153
- Harmeling, S. (2010). *Global climate change index 2011. Who suffers most from extreme weather events? Wheather-related loss events in 2009 and 1990 to 2009*. Germanwatch briefing paper. pp. 24
- Huet, L., Mena, M. (1999). *Diagnóstico del Drenaje Urbano en el Área Metropolitana de San Salvador*. Banco Inter-Americano de Desarrollo (BID).
- Inypsa, (2018). *Elaboración del catastro físico y topográfico del macro y micro drenaje pluvial en el Área Metropolitana de San Salvador, El Salvador*. Ministerio de Obras Públicas, Transporte, Vivienda y Desarrollo Urbano (MOPTVDU).
- Lotti, C. y Associatti, (2002). *Diagnóstico y factibilidad del sistema secundario de drenajes de aguas lluvias en cuatro zonas críticas del Área Metropolitana de San Salvador y diseño final de la zona más crítica*. Ministerio de Obras Públicas, Transporte, Vivienda y Desarrollo Urbano (MOPTVDU). pp. 143
- MARN, (2012). *Escenarios de riesgo: Amenaza por inundación. Cuenca alta del río Acelhuate: Arenal Montserrat, Arenal Mejicanos, Arenal Tutunichapa, Quebrada El Garrobo*. Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN). Dirección General del Observatorio Ambiental. pp. 70.
- MARN, (2018). *Tercera comunicación nacional de Cambio Climático, El Salvador*. Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN). pp. 221
- OPAMSS, (2016). *Esquema Director del Área Metropolitana de San Salvador*. Oficina de Planificación del Área Metropolitana de San Salvador (OPAMSS).
- SNET, (2019). Servicio Nacional de Estudios Territoriales, Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN). 20/09/2019. <http://mapas.snet.gob.sv/hidrologia/select.php>, e-mail: medioambiente@marn.gob.sv
- SWECO, (2003). *Plan maestro para drenaje de aguas lluvias en el Área Metropolitana de San Salvador*. Oficina de Planificación del Área Metropolitana de San Salvador (OPAMSS).
- Tucci, C. (2007). *Gestión de Inundaciones Urbanas*. Organización Meteorológica Mundial. pp. 317
- UNDAC, (2010). *Evaluación de la capacidad nacional para la respuesta a emergencias*. El Salvador. Equipo de Naciones Unidas de Evaluación y Coordinación de Desastres (UNDAC). pp. 77
- Vielca, (2017). *Proyecto de obras de amortiguamiento del macrodrenaje pluvial del Área Metropolitana de San Salvador, El Salvador*. Ministerio de Obras Públicas, Transporte, Vivienda y Desarrollo Urbano (MOPTVDU).
- Youtube, (2019), ElSalvadorcom. *El Salvador*. 30/09/2019. <https://www.youtube.com/watch?v=03gm3L-2Wtw>, e-mail: info@elsalvador.com.

Como citar este artículo:

Gómez Blanco, P., Fernández Martínez, L., Flores, Enrique, Hernández, O. (2019). Planteamiento del problema y propuesta de soluciones para abordar el desafío de la gestión de las aguas lluvias en el área metropolitana de San Salvador (AMSS), El Salvador. *Aqua-LAC* Volumen 11(2), 71-84. doi: 10.29104/phi-aqualac/2019-v11-2-07



Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International
CC BY-NC-SA 4.0 license