

Artículos de investigación

Análisis de vulnerabilidad de obras viales en Uruguay ante el cambio climático

Analysis of climate change vulnerability of road constructions in Uruguay

Alice Elizabeth González-Fernández*

Martín Paz-Urban*

Martín Goyeneche*

Recibido: octubre 31 de 2021.

Aceptado: julio 18 de 2022.

Resumen

El cambio climático es uno de los grandes hitos históricos en la gestión ambiental, que ha marcado un punto de inflexión en la mirada hacia los problemas ambientales: prepararse por anticipado es una de las pocas formas de encarar responsablemente la gestión ambiental en muchos ámbitos, especialmente en la gestión pública. En el marco de un acuerdo de trabajo entre el Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO) y la Fundación Julio Ricaldoni (FJR) de la Facultad de Ingeniería (UdelaR) de Uruguay, un equipo técnico interinstitucional llevó adelante un estudio de vulnerabilidad ante el cambio climático de obras de arte viales (puentes). Los grandes lineamientos y los tres productos a alcanzar formaban parte de los términos de referencia del Programa Rehabilitación y Mantenimiento Vial 8733-UY financiado por el Banco Mundial, y su cumplimiento satisfactorio se traducía en sendos desembolsos. Tales productos eran: una metodología de abordaje y selección de veinte obras de arte con las que se trabajaría; un análisis de vulnerabilidad de cada una de ellas ante eventos hidrometeorológicos, aplicando matrices de riesgo construidas ad-hoc en función de la metodología propuesta; y los planes de acción ante contingencias hidrometeorológicas, desarrollados a nivel operativo para dos de las obras consideradas. En este trabajo se presentan en forma detallada los tres productos, considerando desde el desarrollo metodológico de cada uno hasta los resultados obtenidos en cada fase.

Palabras clave: análisis de vulnerabilidad, contingencias hidrometeorológicas, matriz de riesgos, obras viales, Uruguay.

Abstract

Climate change is one of the great historical milestones in environmental management, which has marked a turning point in the sightseeing towards environmental problems: preparing in advance is one of the few ways to responsibly approach environmental management in many areas, especially in public management. Within the framework of an agreement between Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO) and Fundación Julio Ricaldoni (FJR) from Facultad de Ingeniería (UdelaR) in Uruguay, an inter-institutional technical team carried out a study of vulnerability to climate change of road bridges. The main guidelines and the three products to be achieved were part of the terms of reference of the Road Rehabilitation and Maintenance Program 8733-UY financed by the World Bank. Their satisfactory fulfillment was mandatory for allowing three individual disbursements. The abovementioned products were: a methodology for approaching and selecting twenty bridges for next working phases; an analysis of the vulnerability of each one of them, faced to hydrometeorological events, by using ad-hoc risk matrices with basis on the proposed methodology; and action plans for hydrometeorological contingencies, developed at the operational level for two of the considered bridges. In this paper, the three products are presented in detail, considering from the methodological approach to each one of the final products achieved.

Keywords: vulnerability analysis, hydrometeorological contingencies, risk matrix, road constructions, Uruguay.

* Universidad de la República, Uruguay. Correos electrónicos: elizabet@fing.edu.uy, martin.paz@externo.mtop.gub.uy, martin.goyeneche@externo.mtop.gub.uy

Introducción

Este trabajo recoge una experiencia de trabajo interinstitucional en el marco del Programa Rehabilitación y Mantenimiento Vial 8733-UY financiado por el Banco Mundial. Fue llevada adelante entre el Departamento de Ingeniería Ambiental del Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (en adelante DIA-IMFIA) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República (FING-UdelaR) y el Ministerio de Transporte y Obras Públicas (en adelante MTOP) de la República Oriental del Uruguay, a través de las Direcciones Nacionales de Planificación y Logística, de Vialidad y de Topografía, a través de un acuerdo de trabajo suscrito entre el MTOP y la Fundación Julio Ricaldoni (en adelante FJR) de la FING-UdelaR.

El objetivo era dar satisfacción a ciertos compromisos contractuales referidos a resiliencia de la infraestructura vial ante el cambio climático, que implicaban la generación de tres informes técnicos asociados con la evaluación de la infraestructura existente ante tales eventos. Estos tres informes eran condición necesaria para que se efectivizaran otros tantos desembolsos del Programa. Se constituyó un grupo de trabajo que dio en llamarse “Grupo Resiliencia Vial al Cambio Climático” (en adelante, GReV-CC). El equipo de trabajo resultó un ámbito fermental de análisis, discusión e intercambio, que permitió ‘bajar a tierra’ los lineamientos del Banco, definir y poner en práctica una metodología que resultó eficaz y robusta, y que permitió obtener resultados sólidos para alcanzar los objetivos propuestos.

La metodología a aplicar se enmarcó en el enfoque actual del IPCC acerca de vulnerabilidad y riesgo, que centra la mirada en eventos de menor intensidad pero con mayor probabilidad de ocurrencia, que constituyen un conjunto de “pequeños desastres recurrentes” que obligan a fomentar una mayor capacidad de adaptación para poder prevenir las consecuencias adversas de tales eventos. Cardona et al. (2012) expresan la gestión del riesgo de desastres como un proceso social que permite un cambio en el enfoque de responder al evento de desastre hacia una comprensión del riesgo de desastre (...). Esto requiere conocer cómo las interacciones humanas con el medio natural conducen a la creación de nuevos peligros, y cómo las personas, propiedades, infraestructura, bienes y el ambiente están expuestos a eventos potencialmente dañinos. Además, requiere una comprensión de la vulnerabilidad de las personas y sus medios de vida, incluida la asignación y distribución de recursos sociales y económicos que pueden trabajar a favor o en contra del logro de resistencia, resiliencia y seguridad.

La Directiva 2007/60/CE de la Unión Europea define, en su artículo 2º, los conceptos de “inundación” y de “riesgo de inundación” de la siguiente forma:

- inundación: anegamiento temporal de terrenos que no están normalmente cubiertos por agua. Incluye las inundaciones ocasionadas por ríos, torrentes de montaña, corrientes de agua intermitentes del Mediterráneo y las inundaciones causadas por el mar en las zonas costeras, y puede excluir las inundaciones de las redes de alcantarillado;

- riesgo de inundación: combinación de la probabilidad de que se produzca una inundación y de las posibles consecuencias negativas para la salud humana, el medio ambiente, el patrimonio cultural y la actividad económica, asociadas a una inundación.

La citada Directiva prevé, en su artículo 4º, que los Estados miembro realicen evaluaciones preliminares de riesgos de inundación. Deben a su vez presentar mapas de peligro de inundación que, según EXCIMAP (2007):

...muestran áreas que podrían inundarse de acuerdo con tres probabilidades (baja, media alta) complementadas con: tipo de inundación, extensión de la inundación, profundidades de agua o niveles de agua según corresponda; en su caso, la velocidad del flujo de agua o la dirección principal del flujo.

La *baja probabilidad de inundación* no está cuantitativamente definida, por lo que algunos países consideran la avenida de período de retorno $T_r = 300$ años aunque otros toman valores mucho más altos, como por ejemplo Suecia, que emplea $T_r = 10.000$ años. La probabilidad media de inundación considera valores de $T_r \geq 100$ años. Períodos de recurrencia menores se emplean para representar eventos con alta probabilidad de ocurrencia. Los mapas deben incluir, entre otros elementos, las superficies que se estima se inundarán y elementos que permitan caracterizar los sitios potencialmente afectados, como rutas, vías férreas, actividades económicas, edificaciones, así como el parcelario y el número aproximado de personas que podrían resultar afectadas, entre otros. Según Nixon *et al.* (2016), otros mapas de interés para la gestión de inundaciones son los que muestran la altura del pelo de agua durante la inundación, la velocidad del flujo o la peligrosidad de la inundación (considerada una combinación del período de retorno y la severidad del evento).

Además de analizar la normativa de la Unión Europea (2007), se revisó bibliografía técnico-científica para dimensionar la problemática con perspectiva multidimensional, considerando aspectos sociales, económicos, ambientales e institucionales. Entre tales trabajos, corresponde citar a Veleda, Martínez-Graña, Santos-Francés, Sánchez-San Roman y Criado (2017), que emplean el modelo hidrológico-hidráulico HEC-RAS y el software de SIG ArcGis 10.1, con el objetivo de evaluar espacialmente el riesgo como producto de peligro, vulnerabilidad y exposición. Los autores concluyen que los resultados están fuertemente condicionados por la lluvia de diseño que se emplea y por las condiciones de humedad inicial del suelo.

El empleo de estas mismas herramientas de modelación se encontró también en otros artículos. Papaioannou, Loukas y Vasiliades (2019) indican cuatro componentes clave para el análisis de eventos hidrometeorológicos: la estimación de la tormenta de diseño, la modelación hidrológica, la modelación hidrodinámica y la aplicación de sistemas de información geográfica. La modelación hidrodinámica también aplicó HEC-RAS. En este caso, las simulaciones se realizaron con tres condiciones de humedad del suelo (seco, medio

y húmedo) y para tres períodos de retorno ($T_r = 50$ años, $T_r = 100$ años y $T_r = 1000$ años). El reporte sobre resiliencia en Coulibistrie, Dominica (The World Bank, 2018) aplica también la modelación hidráulica con HEC-RAS v5.03 (US Army, Corps of Engineers, 2016).

Una vez obtenidos los resultados de la modelación para diferentes períodos de retorno, es necesario evaluar los costos socioeconómicos directos e indirectos derivados de su ocurrencia, con el objetivo no sólo de prever la atención de los impactos adversos sino también para destinar recursos suficientes a tareas de monitoreo y preparación, y fortalecer la resiliencia de las comunidades; la asignación de recursos a estos últimos aspectos forma parte del cambio cultural necesario que las sociedades actuales se ven obligadas a asumir a causa del cambio climático.

Una forma usual para presentar esta información y contribuir a una gestión inteligente y efectiva ante la ocurrencia de uno de estos eventos, consiste en el uso de *matrices de riesgo*. Las matrices de riesgo son cuadros de doble entrada en que se interrelacionan factores de *vulnerabilidad* y factores de *peligrosidad*, de modo tal de identificar y jerarquizar las consecuencias que pueden ocasionar eventos hidrometeorológicos de diferente magnitud sobre la infraestructura. Los *factores de vulnerabilidad* son aquellas características propias de la obra considerada –incluyendo su entorno inmediato–, que la hacen más proclive a fallar; se refieren a *la disposición intrínseca a ser dañado*. Habrá que preguntarse entonces cuáles son las características de una obra de arte que la hacen más susceptible de verse afectada por la amenaza (el evento) en cuestión. Por su parte, los *factores de peligrosidad*, por el contrario, no dependen de la obra considerada sino que están vinculados fundamentalmente a los eventos hidrometeorológicos. El factor que se suele considerar como más representativo es el período de retorno.

La metodología consiste en cruzar estos factores y asignarles, un valor que refleje la *probabilidad de ocurrencia* y la *magnitud de las consecuencias* de los eventos, a través de aspectos como *probabilidad* y *gravedad* (u otros que se consideren representativos). Estas escalas podrán ser cuantitativas, cualitativas, o una combinación de ambas (GReV-CC, 2020a). El *riesgo* puede ser representado de varias maneras, pero aquí se verá como función del peligro o amenaza y de la vulnerabilidad o susceptibilidad del receptor a ser doblegado por ese peligro. La existencia de un riesgo implica, por definición, la potencial presencia de un peligro, es decir, de un agente que tenga la probabilidad de ocasionar daños. Éstos serán de diferente índole y entidad dependiendo del nivel de vulnerabilidad de la infraestructura que se vea afectada. En el caso de las inundaciones, es necesario obtener datos confiables sobre las características físicas de la zona afectada y de su población (tamaño, distribución, densidad, características económicas, culturales, educación, cobertura de salud, entre otras). Los efectos de las tormentas estudiadas se refieren a la destrucción de acervos físicos (daños) y a la alteración de los flujos económicos (pérdidas y costos adicionales).

En consecuencia, es necesario conocer en forma lo más cuantitativa posible la realidad previa –en general a través de información cuantitativa publicada por fuentes oficiales o documentos basados en ellas–, así como los daños, pérdidas y costos adicionales

que ocasionan estos desastres, de modo de poder realizar una cuantificación lo más ajustada posible de sus costos e impactos. Como en este estudio se aboga por cuantificar la mayor cantidad posible de aspectos de interés, se propone cuantificar parámetros para cada obra y su entorno cercano antes y después de la ocurrencia del evento hidrometeorológico adverso que se esté estudiando y, a partir de las diferencias, procurar evaluar la magnitud del impacto en forma cuantitativa (incluyendo también la cuantificación económica).

En la tercera etapa de trabajo, cuyo producto era la elaboración de planes de contingencias para des de los casos estudiados en la Fase II, se tomaron como punto de partida los antecedentes y procedimientos que tiene implementados el SINAE junto con los Centros de Coordinación de Emergencias Departamentales CECOED, atendiendo tanto a las prácticas exitosas como a las oportunidades de mejora que las instituciones hubieran detectado a partir de su aplicación (SINAE, 2014). Asimismo, y ante la particularidad de que dos puentes colapsaron (por causas no hidrometeorológicas) en Uruguay en 2018, en los Departamentos de Colonia y Durazno, también resultaron objeto de análisis los planes ejecutados que funcionaron en tales eventos, así como los antecedentes históricos recientes relativos a los puentes sobre el Río Rosario (Ruta 1) y el Canal Andreoni (Ruta 9) (Nicolini y Souto, 2017).

En el siguiente apartado se presenta la metodología seguida en cada una de las fases del mismo; luego se presentan y discuten los resultados y, por último, se presentan las conclusiones del trabajo.

Metodología

La metodología propuesta y llevada adelante por el GReV-CC se divide en tres fases, de acuerdo con la estructura del trabajo y con sus productos.

a) Fase I

En el inicio de este trabajo se comenzó por recopilar los antecedentes nacionales que pudieran cooperar a definir el conjunto de 20 obras de arte (puentes o grandes alcantarillas) a considerar en las siguientes fases de este estudio. Entre las instituciones que se consideraron posibles depositarias de información de utilidad, cabe citar: el Sistema Nacional de Emergencias (SINAE); el Instituto Uruguayo de Meteorología (INUMET); la Administración Nacional de Puertos (ANP); la Dirección Nacional de Aviación Civil e Infraestructura Aeronáutica (DINACIA); la Dirección Nacional de Bomberos (DNB); la Dirección Nacional de Policía de Tránsito (DNPT); el Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca (MGAP); el Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA).

Gracias al apoyo del SINAE, que facilitó la base de datos de eventos ocurridos entre 1983 y 2017 (más de 4000 registros), fue posible realizar un análisis retrospectivo de más de 30 años de información, que permitió detectar primero que 1062 de los registros correspondían a eventos no ocurridos en área urbana y con causas naturales (SINAE, 2018). Éstos se analizaron uno a uno en profundidad, corroborando la causa y ubicación. La base

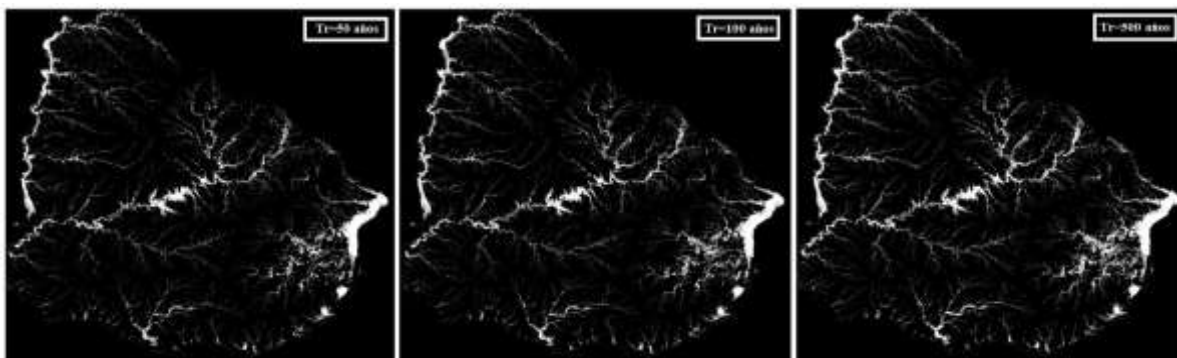
final de eventos hidrometeorológicos ocurridos próximos a rutas quedó constituida por 147 eventos; una vez que se los asoció a la ruta respectiva, únicamente 12 rutas tuvieron asociados 2 o más eventos y de ellas, sólo 7 tuvieron asociados 5 o más eventos.

Como dos de ellas pertenecen a la red secundaria, se analizaron las otras tres (Rutas 6, 11 y 21), que corresponden a la red vial primaria o a la de corredores internacionales. Se realizó un ejercicio de jerarquización, considerando un indicador de densidad de cruces de agua en cada ruta (en km/cruce), el promedio de ejes equivalentes por tramo, el tipo de carga que se transporta y la vinculación con el turismo. De allí surgió que la ruta de mayor interés para este estudio era la Ruta 11 (GReV-CC, 2019).

Otro camino explorado por el GReV-CC, al contar con el apoyo explícito del Banco para hacerlo, fue aplicar un modelo global. El conjunto de datos SSBN Global Flood Hazard (Banco Mundial y Oxford Analytics, 2019), que fue suministrado ad-hoc por el Banco Mundial, se refiere a riesgo de inundación global y ofrece la profundidad máxima esperada del agua, en metros, para 10 valores diferentes de T_r comprendidos entre 5 años y 1000 años. Sin embargo, en este caso los resultados obtenidos no contribuyeron a definir las zonas más vulnerables ante eventos hidrometeorológicos, ya que en las salidas de la modelación resultan resaltadas las áreas correspondientes a humedales, embalses, lagunas costeras y las trazas de los principales ríos del país (ver cuadro 1).

El GReV-CC (2019) lo consignaba señalando que las áreas que se resaltan en cada caso corresponden principalmente a los Bañados del Este, los Bañados del Santa Lucía, los embalses del Río Negro, las lagunas costeras del Este y las trazas de los principales ríos del Uruguay (Río Uruguay, Río Negro, Río Santa Lucía, Río Cuareim, Río Tacuarembó, Río Cebollatí, entre otros).

Cuadro 1. Salidas de la modelación SSBN Global Flood Hazard de inundaciones, para períodos de retorno de 50, 100 y 500 años (basado en Banco Mundial y Oxford Analytics, 2019)



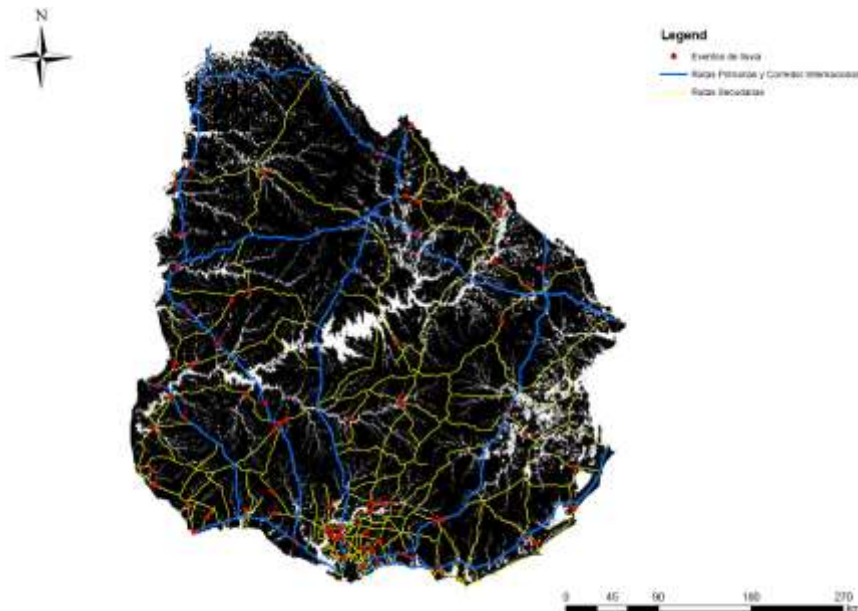
Fuente: Grupo Resiliencia Vial al Cambio Climático GReV-CC p.15 (2019).

Al comparar los resultados para diferentes períodos de retorno (por ejemplo, entre 50 y 100 años o entre 100 y 500 años), las variaciones en las áreas afectadas apuntan principalmente a incrementar las áreas inundadas en las zonas bajas (bañados) o el ancho en la traza de los principales ríos, pero no parecen reflejar las situaciones en los puntos en que ocurre la mayor parte de los eventos hidrometeorológicos perjudiciales para la trama vial y sus obras de arte, o en lugares identificados por el SINAE como puntos en que ocurren la mayor cantidad de esos eventos cada año. Es posible que esto se deba a la discretización de la información de base, que emplea una grilla demasiado gruesa como para obtener resultados aprovechables directamente para satisfacer los objetivos planteados.

Para despejar posibles dudas, en el cuadro 2 se presenta a una escala más detallada el mapa con la salida de la modelación proporcionada por el Banco Mundial (Banco Mundial y Oxford Analytics, 2019) para $Tr = 100$ años (las zonas de mayor riesgo de inundación corresponderían a las áreas en blanco), en el que se han superpuesto las capas de rutas nacionales (red primaria y corredores internacionales en azul, red secundaria en amarillo) y las zonas de ocurrencia de eventos de lluvia de interés seleccionados en el trabajo sobre la base de SINAE (2018) (puntos rojos).

Finalmente, se decidió considerar un conjunto de 25 obras preseleccionadas junto con la Gerencia de Estudios y Proyectos de la DNV -que a su vez consultó a las Gerencias Regionales- (ver Cuadro 3) y realizar, una a una, una modelación a modo de 'screening' para estimar las áreas posibles de ser inundadas ante una tormenta de $Tr = 100$ años (es el período de retorno que se suele aplicar en Uruguay para el diseño de obras de drenaje vial).

Cuadro 2. Salida de la modelación SSBN Global Flood Hazard de inundaciones para $Tr = 100$ años, en relación con trazas de la red vial y eventos hidrometeorológicos de interés tomados de la base de SINAE, 2018



Fuente: Grupo Resiliencia Vial al Cambio Climático GReV-CC, p.17 (2019).

Cuando los resultados sobrepasaran la capacidad de campo del suelo, superaran el volumen máximo de transporte del curso de agua y sobrepasaran la infraestructura vial considerada, la obra en cuestión pasaría a la segunda fase del estudio (GReV-CC, 2019).

Para llevar adelante estas actividades, la información que debió relevarse acerca de cada uno de los puentes a modelar fue (GReV-CC, 2020a p.11):

- ubicación en el río: River Station.
- distancia a la sección aguas arriba.
- ancho del tablero del puente en la dirección del flujo.
- descripción geométrica del puente, la cual se basa en dar la cota inferior y superior del puente para cada coordenada 'x' de la sección transversal.
- descripción geométrica de las pilas del puente, cantidad, ubicación de cada una.
- descripción geométrica de los estribos.

Cuadro 3. Localización de las obras seleccionadas en conjunto con la Gerencia de Estudios y Proyectos (DNV-MTOP), georreferenciadas sobre mapa de Google Earth



Fuente: Grupo Resiliencia Vial al Cambio Climático GReV-CC, p.5 (2020a).

La modelación inicial implica determinar la cuenca en que se encuentra el curso de agua, sistematizar sus características, obtener un hidrograma de $Tr = 100$ años, transitarlo por el curso de agua y analizar luego las consecuencias resultantes de ese tránsito. Los hidrogramas de avenida correspondientes al período de retorno seleccionado (100 años) se

obtuvieron, según el caso, por el método racional o por el método del hidrograma unitario que proponen Silveira, Genta, Charbonnier, Failache y Alonso (2000), el que a su vez se basa en el método del US Natural Resources Conservation Service (US-NRCS, 1985). El método ha sido desarrollado para estimar el volumen de escurrimiento asociado a un evento extremo y el hidrograma de crecidas para pequeñas cuencas no aforadas a partir de las curvas IDF, las cuales fueron obtenidas a partir de series históricas de precipitación. Permite calcular un volumen de escurrimiento teórico y aproximado de eventos extremos a partir de la precipitación, las características del suelo, la cobertura de la cuenca y las condiciones antecedentes de humedad con datos de Uruguay.

La modelación hidráulica de cada obra se realizó aplicando HEC-RAS v.5.03 (US Army Corps of Engineers, 2016) y la visualización se realizó con el software ArcGis v.10.1. HEC-RAS es un software cuyo esquema de resolución es por diferencias finitas. Su uso es frecuente cuando se dispone una topografía con buena definición en el área de interés del caso a analizar, siempre que éste pueda estudiarse bajo las hipótesis de flujo unidimensional, estacionario o variable, en régimen subcrítico, supercrítico o mixto. Se requiere además fijar las condiciones de borde y las condiciones iniciales del modelo, que en esta primera fase correspondieron a flujo uniforme con el caudal medio en el curso de agua. En síntesis, la preparación de cada corrida del modelo hidráulico comprende los siguientes pasos en cada una de las obras de interés (US Army Corps of Engineers, 2016; GReV-CC, 2020a, p.9):

- Definición de la geometría de cauce y llanuras de inundación mediante perfiles transversales dispuestos de manera perpendicular a las líneas de corriente.
- Definición de la geometría de las estructuras como obstrucciones a la sección de flujo.
- Incorporación de elementos especiales como zonas inefectivas y 'bucles' (levee), para impedir que HEC-RAS llene simultáneamente todas las depresiones de la llanura de inundación que se encuentren por debajo de una determinada cota.
- Determinación de los coeficientes de rugosidad de Manning, obtenidos en el cauce a partir de su naturaleza y propiedades morfológicas, y en las llanuras de inundación en función de los usos del suelo.
- Adopción de coeficientes de contracción y expansión entre secciones y de desagüe en estructuras, coherentes con las recomendaciones del HEC-RAS.
- Elección del método de cálculo para modelar tanto caudales bajos (aquellos en que la cota del agua está por debajo del tablero del puente) y caudales altos, aquellos que ponen en carga el puente, haciendo que éste funcione en parte como flujo a través de un orificio.
- Elección de las condiciones de contorno aguas arriba y aguas abajo.
- Adopción de las condiciones iniciales del sistema al comienzo de la simulación (en la primera fase corresponde a flujo uniforme a caudal medio).

Para cada uno de los puentes, se prepararon dos fichas, una con la información de base y otra con la información de salida de la modelación de Fase I. Como era de esperar de acuerdo con los estándares de criterio aplicados en el país, se constató que los tableros de la mayoría de las obras de arte consideradas no quedan sumergidas. De todos modos, ocurren cortes en las rutas, al quedar bajo agua el pavimento. A modo de ejemplo, en el Cuadro 4 se muestra un sector de la planilla de síntesis de resultados de la Fase I. En la ficha 1 de cada puente se presenta (GReV-CC, 2020a):

- La ubicación de la obra (ruta y km) y nombre del curso de agua sobre el que se ubica.
- El perfil longitudinal del puente, obtenido de la información disponible en el Archivo Gráfico de la Gerencia de Estudios y Proyectos de DNV.
- La ubicación de la obra en un plano de nuestro país.
- Las características principales de la obra (longitud del tablero, principales dimensiones de éste y de los pilares).
- La delimitación de la cuenca de aporte, sobre cartografía de ArcGis.
- La caracterización de las Unidades de Suelos que se presentan en ella, tomadas de la Carta de Suelos del Uruguay.
- Las principales características de la cuenca (área, longitud del cauce principal, pendiente media y tiempo de concentración T_c).
- Las principales características del hidrograma de salida para un período de retorno Tr de 100 años.

En la ficha 2 (ver cuadro 5), la información que se presenta incluye (GReV-CC, 2020a):

- La cota máxima de inundación y el área inundada en la sección del puente.
- La cota máxima que alcanza el agua en las diferentes secciones a lo largo del cauce principal.
- La mancha de inundación a las 24 horas de iniciado el evento
- La mancha máxima de inundación para el hidrograma de $Tr = 100$ años
- La evolución temporal de la altura del pelo de agua en el emplazamiento del puente.
- La evolución temporal del caudal de pasaje por el emplazamiento del puente (limnigrama e hidrograma).
- Área inundada a las 24 horas del inicio de la tormenta
- Área máxima inundada.
- Comentarios relevantes acerca de las consecuencias de la inundación (por ejemplo, longitud y duración del corte de ruta; tipo de superficie afectada (urbana, forestación, cultivos, etc.) y su área; inundación de centros poblados.

Cuadro 4. Síntesis de resultados de Fase I (parte)

Puente	Área máxima (km ²)	Área 24 horas (km ²)	Sobrepasa Tablero	Observaciones
Rinchudo	6.2	4.5	NO	Inundación registrada en localidad Rinchudo del Departamento de Colonia: área máxima 10489.2 m ² , altura del agua por encima del terreno de hasta 1.2 m. Corte Ruta 1: 0.85 km
Colla	30.1	18.4	NO	Inundación registrada en localidad Rosario del Departamento de Colonia: área máxima 514061 m ² , altura del agua por encima del terreno de hasta 2.0 m. Corte Ruta 1: 0.70 km Corte Ruta 61: 0.90 km Corte Ruta 52: 0.31 km Corte Ruta 7: 0.22 km Corte Ruta 80: 0.30 km
Podernal	9.6	-	NO	
Aigua	37.6	-	NO	Inundación registrada en localidad Aigua del Departamento de Maldonado: área máxima 3211 m ² , altura del agua por encima del terreno de hasta 0.8 m. Corte Ruta 13: 0.60 km Corte Ruta 39: 0.10 km Corte Ruta 21: 0.60 km Corte Ruta 54: 0.40 km Corte Ruta 7: 0.40 km
Miguelito	24.3	21.8	NO	
Mansavilanga	6.7	3.5	NO	
Parao (R18)	78.3	33.4	NO	Inundación registrada en localidad Vergara del Departamento de Treinta y Tres: área máxima 147659 m ² , altura del agua por encima del terreno de hasta 1.9 m. Corte Ruta 18: 2.2 km Corte Ruta 91: 1.8 km
Parao (R91)	78.3	33.4	SI	
Las Flores	0.7	-	NO	
Vi	51.3	49.2	SI	Corte Ruta 6: 0.60 km
Zanja Honda	2.7	-	SI	Corte Ruta 5: 0.10 km
Catalán Grande	6.8	-	NO	
Mulhajar	2.2	-	NO	Corte Ruta 6: 0.14 km
Potrero	4.9	-	SI	Corte Ruta 7: 0.13 km Corte Ruta 22: 0.60 km Corte Ruta 21: 0.75 km Corte Ruta 54: 0.30 km
San Juan	42.8	33.1	NO	
Olmur	102.2	75.3	NO	Inundación registrada en Ciudad de Treinta y Tres: área máxima 345961 m ² , altura del agua por encima del terreno de hasta 1.0 m. Corte Ruta 8: 0.30 km
San José	98.0	40.3	SI	Inundación registrada en ciudad San José de Mayo: área máxima 194786 m ² , altura del agua por encima del terreno de hasta 1.0 m. Corte Ruta 11: 0.40 km
Las conchas (R9)	6.6	4.7	NO	Corte Ruta 15: 0.5 km
Las conchas (R15)	1.4	-	NO	
Arroyo Grande	285.1	-	NO	Corte Ruta 37: 2.2 km Corte Ruta 14: 0.50 km
Santa Lucía	226.8	76.3	SI	Inundación registrada en localidad San Ramón del Departamento de Canelones: área máxima 337062 m ² , altura del agua por encima del terreno de hasta 0.8 m. Corte Ruta 6: 0.6 km Corte Ruta 7: 2.6 km Corte Ruta 8: 2.9 km

Fuente: elaboración propia, basado en Grupo Resiliencia Vial al Cambio Climático (2020a).

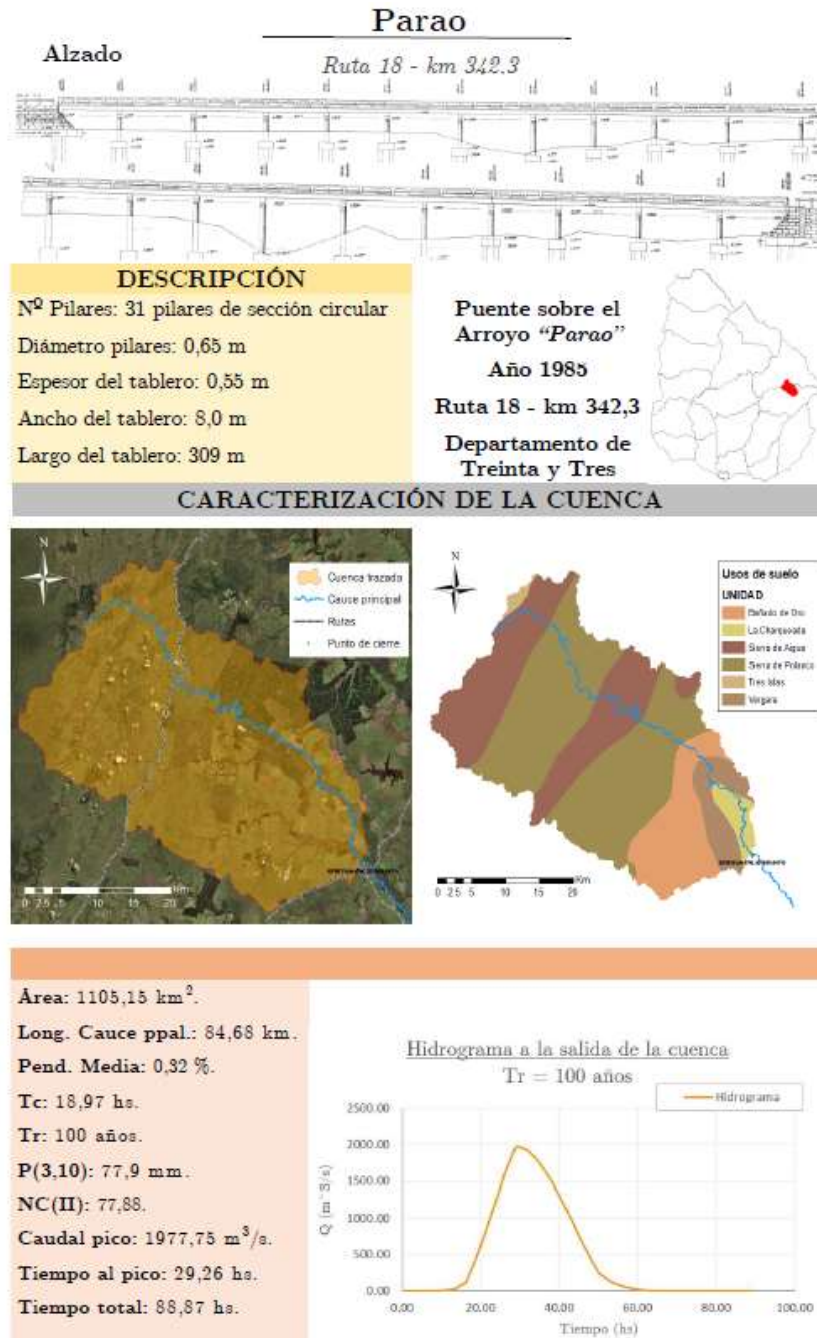
La información de las fichas contribuyó a tomar la decisión de cuáles serían las 20 obras con las que se seguiría adelante en la siguiente fase del estudio, que es la que se reseña en la próxima sección. Por añadidura, cabe indicar que la metodología propuesta es compatible con y emplea los instrumentos que proponen los trabajos más actuales a nivel internacional.

b) Fase II

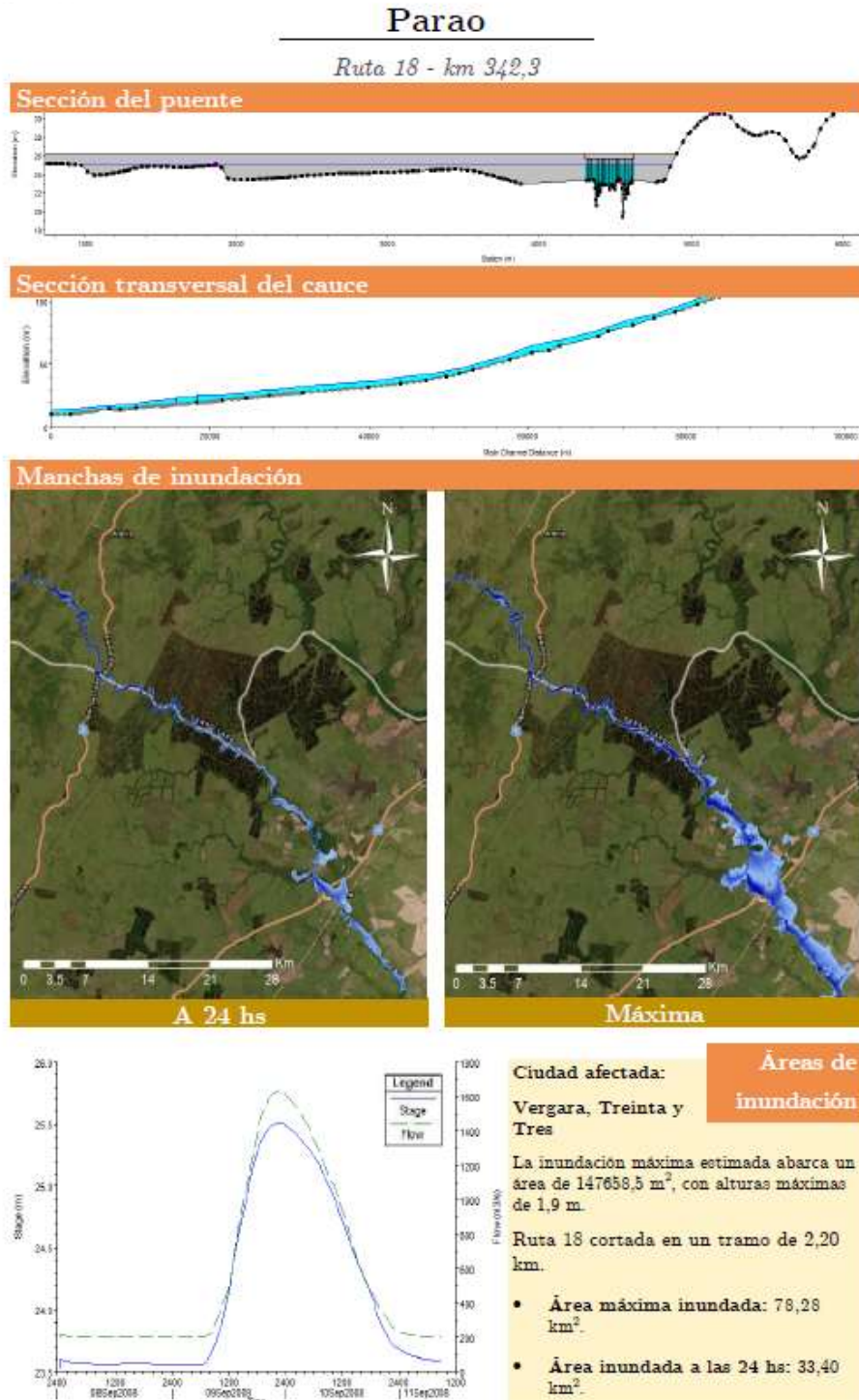
En la segunda fase del proyecto correspondía realizar el análisis de detalle de cada una de las 20 obras seleccionadas. La metodología del análisis estuvo fuertemente basada en las referencias presentadas al comienzo de este capítulo y en concordancia con lo presentado en la sección relativa a la Fase I. Una diferencia a señalar es que las condiciones iniciales impuestas en la modelación con HEC-RAS esta vez implican que la avenida

comienza con el curso de agua en las condiciones en que se encontraría 24 horas después de concluida la lluvia de $T_r = 100$ años. De acuerdo con Gabriel-Martin *et al.* (2019), esta condición debería ser más exigente que la anterior.

Cuadro 5. Ejemplo de Fichas I y II



Cuadro 5. Ejemplo de Fichas I y II (continuación)



Fuente: Grupo Resiliencia Vial al Cambio Climático GReV-CC (2020a, pp.103-104).

Se trabajó con avenidas de Tr 100, 200 y 500 años, para predecir, cuantificar y evaluar las consecuencias esperables en cada caso. La información de que se dispuso estuvo acorde, en cantidad y calidad, con la obtención de resultados confiables. En particular, y por su importancia, se señala que se pudo aplicar un Modelo Digital del Terreno en formato raster con resolución espacial de 30 x 30 metros y una precisión de interpolación entre puntos de 2,5 metros. Adicionalmente, en algunos casos se pudo disponer de información de elevación del terreno más detallada aún, a partir del nuevo modelo del IDE (Infraestructura de Datos Espaciales de Uruguay): exactitud planimétrica de 1 m y modelos digitales de terreno de 1,5 m, ambos al 95 % de nivel de confianza (GReV-CC, 2020a; US Army Corps of Engineers, 2016).

Algunos de los criterios adoptados en la modelación hidráulica con HEC-RAS y su aplicación para Sistemas de Información Geográfica ArcMap fueron:

- Flujo no permanente
- Secciones cada 200 a 500 m en las cercanías del puente (lejos de él se pueden aplicar mayores distancias)
- Por lo menos cuatro secciones transversales en la zona del emplazamiento del puente, dos de ellas inmediatamente aguas arriba y aguas abajo para representar el área efectiva del cauce a la entrada y salida del puente; y dos más alejadas, también aguas arriba y aguas abajo, para representar el flujo no afectado por la sección del puente y expandido completamente a todo el ancho del cauce.
- Las condiciones de contorno aguas arriba son el hidrograma de flujo (Flow Hydrograph) y profundidad normal. Este método requiere ingresar una pendiente de fricción aguas abajo (pendiente de la línea de energía), que debe colocarse lo suficientemente alejada de la zona del puente como para que cualquier error que produzca no afecte los resultados del estudio.
- Para el tratamiento de la planicie de inundación, el elemento 'Levee' (bucle) representa una estructura dispuesta en sentido longitudinal en una de las márgenes; ésta impide que el agua ocupe las zonas de la llanura de inundación que se encuentran a una cota inferior a la de coronación del bucle hasta que efectivamente el agua rebase esa cota. En otras palabras, este elemento actúa como un muro vertical que impide que el modelo llene de agua simultáneamente todas las depresiones de la planicie de inundación que se encuentran por debajo de una determinada cota y obliga a que el agua llegue allí una vez que desborde desde las zonas más cercanas al curso de agua.

Los puentes son obras que pueden fallar por una sobrecarga o impacto, por socavación, por avenidas, entre otras causas. Éstas últimas pueden ser consecuencias de eventos de tormentas de gran intensidad, y a su vez pueden verse potenciados por una gama de factores que hacen a una estructura más o menos vulnerable. Estas consideraciones, más los argumentos presentados en la Introducción de este capítulo, condujeron a la aplicación de *matrices de riesgo* construidas ad-hoc para procurar interrelacionar los factores de vulnerabilidad (intrínsecos de cada obra) y de riesgo (asociados con el evento peligroso considerado). Una *matriz de riesgos* es una herramienta técnica y visual muy práctica para analizar y comunicar información referente a las posibilidades de que "algo", en este caso

un puente, se vea doblegado debido a sus características intrínsecas que lo hacen vulnerable ante amenazas, es decir, proclive a sufrir daños debido a la ocurrencia de éstas; así como del tipo y magnitud de las consecuencias esperables si la amenaza en cuestión efectivamente ocurriera.

El *análisis de vulnerabilidad* implica considerar un conjunto de factores propios de la obra y sus circunstancias (emplazamiento, estado de conservación, etc.), que son aquellos que hacen que ésta esté más proclive a fallar. Estas características se muestran en el Cuadro 6, agrupadas en función del tipo y severidad de la vulneración.

Cuadro 6. Factores de vulnerabilidad considerados

Factores relacionados a la velocidad del flujo en la sección del puente	Factores relacionados directamente con socavación	Otros factores relacionados con el posible fallo de la estructura
Luz	Forma de las pilas	Espesor del tablero
Separación entre pilas	Tipo de fundación	Estado estructural
Orientación en relación al eje del curso de agua	Estado de las márgenes	Concentración de flujo
Tramo de emplazamiento	Socavación localizada en pilas	
Presencia de elementos singulares que puedan resultar en obstáculos	Socavación localizada en estribo	
Acumulación de sedimentos contra la estructura del puente		

Fuente: Grupo Resiliencia Vial al Cambio Climático GReV-CC, pp.57-58 (2020a).

Las categorías a considerar en cada caso se detallan en el Cuadro 7. Se asignó un valor de 1 a baja vulnerabilidad, 2 a vulnerabilidad media y 3 a vulnerabilidad alta. De la aplicación de estos criterios resultó que casi la mitad de las obras consideradas se consideran de baja vulnerabilidad al fallo, en tanto sólo tres obras se categorizaron como muy vulnerables. Por otra parte, en lo que hace a factores de peligrosidad, los peligros a considerar son: eventos hidrometeorológicos de período de retorno 100, 200 y 500 años; y el colapso estructural de la obra.

Cuadro 7. Características consideradas

Parámetros	Categorías	Interpretación	
Pilares	Forma de pilas	Nariz cuadrada Nariz puntiaguda	Desfavorecen la socavación.
		Nariz redonda Nariz circular Grupos de cilindros	Favorecen la socavación.
	Número de pilas	Si resulta una separación entre pilas inferior a 10 m, se considera el mayor grado de vulnerabilidad, en tanto si es mayor de 20 m, será el más bajo.	
	Orientación	Perpendicular En esviaje	
Tablero	Espesor	A menor espesor, mayor vulnerabilidad estructural	
Tipo de fundación	Directa	La fundación directa reduce las posibilidades y magnitud de socavación	
	Pilotaje		
Concentración de flujo	Sí	La concentración de flujos próximo al puente aumenta su vulnerabilidad.	
	No		
Sección de corte	Tramo recto	La ubicación en un tramo recto reduce la vulnerabilidad.	
	Meandro		
Estado de las márgenes	Vegetación, con o sin mantenimiento	Las opciones con vegetación reducen la vulnerabilidad, en tanto las márgenes desnudas la incrementan.	
	Margen desnuda		
Presencia de elementos singulares que puedan resultar en obstáculos	Sí	El flujo libre reduce la vulnerabilidad.	
	No		
Socavación localizada en las pilas	No se detecta	A mayor socavación, mayor vulnerabilidad ante posible fallo estructural.	
	Moderada		
	Crítica		
Socavación en estribos	No se detecta	A mayor socavación, mayor vulnerabilidad ante posible fallo estructural.	
	Moderada		
	Crítica		
Acumulación de sedimentos contra la estructura del puente	Visible	La presencia de sedimentación visible aumenta la velocidad de pasaje, al reducir la sección de escurrimiento; aumenta la vulnerabilidad de la obra.	
	No visible		
Estado estructural	Bueno	Si el estado estructural no es bueno, la vulnerabilidad y las posibilidades de fallo estructural crecen.	
	Regular		

Fuente: Grupo Resiliencia Vial al Cambio Climático GReV-CC, pp.58-59 (2020a).

Como principales consecuencias, podría ocurrir que se vea superada la cota del tablero de puentes no sumergibles; que puentes sumergibles se mantengan fuera de servicio por más tiempo del considerado en su diseño; que se incremente la erosión localizada en pilas y estribos; que la estructura falle como consecuencia de uno o varios de los efectos mencionados. Asimismo, y considerando la obra integrada en su entorno directo, debe tenerse en cuenta también la gravedad de otras consecuencias vinculadas con las inundaciones, como las pérdidas materiales acaecidas. En cuanto a la severidad de los efectos, tienen en cuenta el tipo de cargas que se transportan en ese tramo de Ruta, la cercanía a puertos y fronteras, las localidades que une y los servicios de que cada una dispone, la existencia de opciones alternativas de conexión con otras localidades durante la interrupción del tránsito a causa de la obra considerada, entre otros.

Otros factores que se tomaron en cuenta al evaluar la severidad de las consecuencias fueron la mayor o menor interdependencia de las localidades más próximas a un lado y otro del puente en cuestión (se tomó vulnerabilidad alta cuando la población de una de ellas fuera más del triple que la población de la otra; salvo en casos turísticos, no se consideraron otras localidades más alejadas), el tránsito promedio diario anual TPDA (menos de 500 vehículos se consideró un bajo nivel de tránsito en tanto más de 2000 se tomó como elevado) y la cercanía a las fronteras y puertos (se dio más peso a puertos, luego a fronteras secas y por último a puentes binacionales). Las consecuencias esperables se presentan en el Cuadro 8, con la especificación de las categorías de magnitud o intensidad consideradas en cada caso.

Cuadro 8. Severidad de consecuencias a evaluar

	Leve	Media	Alta
Nº de viviendas afectadas	hasta 30	entre 30 y 100	más de 100
Nº de habitantes afectados	hasta 100	Hasta 300	más de 300
Servicios afectados	No	Enseñanza	Salud / Enseñanza y salud
Corte Ruta	Hasta 500 m	entre 500 y 5 km	más de 5 km
Transporte de cargas	No	Zafra	Diario (lácteos, puerto)
Turismo	No	Zafra	Todo el año
Bosques, pastizales, praderas, campos naturales	menos de 1 km ²	de 1 a 10 km ²	de 11 a 100 km ²
Zonas urbanas y urbanizadas	hasta 0,05 km ²	de 0,05 a 0,1 km ²	más de 0,1 km ²
Cultivo y rastrojo seco	hasta 0,25 km ²	de 0,25 a 1 km ²	más de 1 km ²
Cultivo y rastrojo de arroz	hasta 0,5 km ²	de 0,5 a 5 km ²	más de 5 km ²
Playas, dunas y médanos fijos y semifijos	hasta 0,1 km ²	de 0,1 a 0,5 km ²	más de 0,5 km ²
Cultivos extensivos en predios lecheros	hasta 0,5 km ²	de 0,5 a 1 km ²	más de 1 km ²
Canteras, areneras, minas a cielo abierto	hasta 0,1 km ²	de 0,1 a 0,5 km ²	más de 0,5 km ²
Zona hortifrutivicultura	hasta 0,05 km ²	de 0,05 a 0,2 km ²	más de 0,2 km ²
Cabezas de ganado perdidas	menos de 50	51 a 500	más de 500

Fuente: Grupo Resiliencia Vial al Cambio Climático GReV-CC, p.60 (2020a).

La magnitud física se obtiene de la información recabada de distintas fuentes y, en los hechos, de la inspección visual de los activos afectados. Dada la diversidad de los activos, la afectación se expresa en diferentes unidades físicas. Por ejemplo, en el sector vivienda, la unidad física se refiere al número de viviendas afectadas o destruidas; en el caso de una carretera, se refiere al número de kilómetros afectados o destruidos; en el caso de cabezas de ganado, a la cantidad de cabezas perdidas.

Cada una de estas consecuencias, a su vez, se cuantificó desde el punto de vista monetario, a través del método de daños y pérdidas. Para ello se considera el precio de reposición o el precio corriente de un bien equivalente al destruido. Los valores monetarios de los daños se estimaron para cada sector en forma lo más detallada posible, atendiendo a la información disponible (por ejemplo, altura de agua en una vivienda o escuela afectada).

El riesgo (R) se puede definir como una función de la probabilidad (P) de que ocurra un incidente no deseado y de la severidad (S) de sus consecuencias. A los efectos de la matriz de riesgos, esto se puede anotar como: $R = P \times S$. Por cierto, la sensibilidad de esta herramienta se encuentra principalmente asociada a la elección de los puntajes de probabilidad y de severidad que se le otorgue a cada interacción. En el Cuadro 9 se anotan los valores empleados en este caso.

Cuadro 9. Código de colores empleado en las matrices de riesgos

Probabilidad \ Severidad	1 (Baja; Tr = 500)	2 (Media; Tr = 200)	3 (Alta; Tr = 100)
1 (Leve)	1 – Aceptable	2 – Tolerable	3 – Moderado
2 (Moderado)	2 – Tolerable	4 – Moderado	6 – Elevado
3 (Severo)	3 – Moderado	6 – Elevado	9 – Severo

Fuente: Grupo Resiliencia Vial al Cambio Climático GReV-CC, p.61 (2020a).

Los productos de esta fase del proyecto se plasmaron en fichas individuales para cada puente, en las que, además de la información de la obra, se presentan las manchas de inundación y las consecuencias esperadas ante la ocurrencia de eventos hidrometeorológicos de T_r 100 años, 200 años y 500 años; la matriz de riesgo y por último, los costos estimados asociados con los eventos de 100 y 500 años de período de retorno. Sólo a los efectos de capitalizar las imágenes presentadas en el cuadro 5, en el cuadro 10 se presentan las dos páginas adicionales que se suman a la ficha de ese mismo puente al concluir el trabajo de fase II.

c) Fase III

La tercera y última fase del proyecto implicaba la realización de Planes de Contingencias a nivel operativo para una o dos de las obras analizadas. Se seleccionaron para ello el puente sobre el Arroyo Colla en su cruce con la Ruta 2 y el puente sobre el Arroyo Parao en su cruce con la Ruta 18. Sin embargo, dado que a nivel nacional las prácticas actuales indican que ante la ocurrencia de una emergencia las diferentes instituciones deben estar a las órdenes del Coordinador Departamental del CECOED (Centro Coordinador de Emergencias Departamental), lo adecuado resultó ser desarrollar un Procedimiento Interno en que se identificaran los recursos humanos y materiales que deben activarse a nivel de la DNV-MTOP, con el fin de garantizar las rutinas de capacitación y mantenimiento preventivo (GReV-CC, 2020b).

Cada uno de los dos Procedimientos desarrollados incluye, como elementos más destacables, la definición del ámbito geográfico de aplicación; el marco legal de aplicación; la caracterización del riesgo considerado; los recursos humanos (integración, capacidad y entrenamiento de los equipos de emergencia) y materiales disponibles, incluyendo maquinaria y equipamiento (acceso y posibilidad de pronto uso); las cadenas de mando y comunicación; procedimientos de activación y fin de la contingencia; procedimientos para operativos de retorno, limpieza y recuperación de áreas afectadas; informe de evaluación de la gestión del evento una vez concluido; capacitación y formación del personal; instancias de monitoreo, evaluación y revisión del plan de contingencia (GReV-CC, 2020b).

Resultados

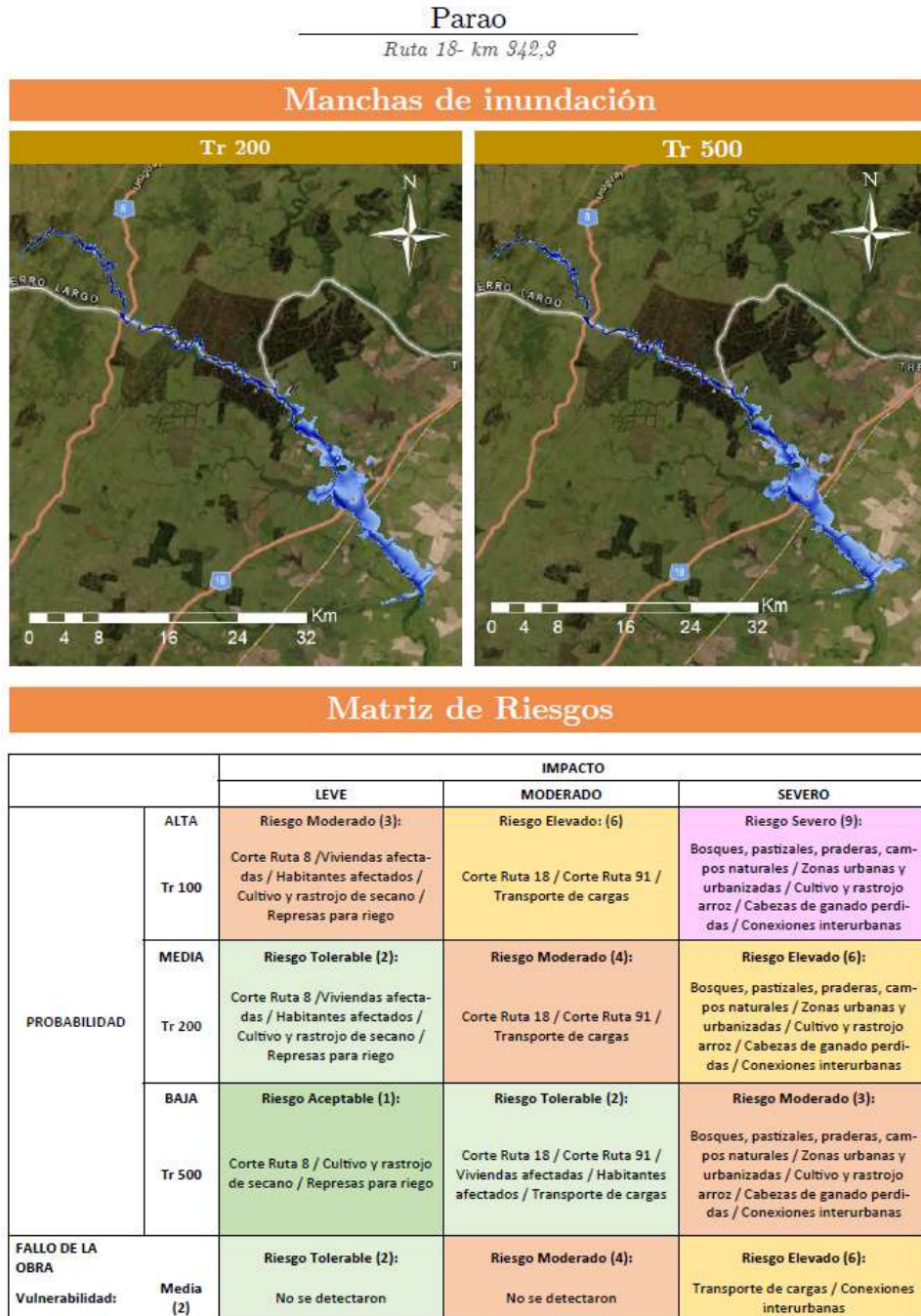
En la práctica, los resultados inmediatos del proyecto fueron los productos solicitados por el Banco Mundial. Sin desmedro de ello, cabe indicar que se desarrolló y puso en práctica exitosamente una metodología de análisis para el análisis de vulnerabilidad de obras viales al cambio climático. Esta metodología es uno de los principales resultados del proyecto. A su vez, de su aplicación se obtuvo un conjunto de fichas técnicas para cada una de las obras analizadas (20 en total); cada una de estas fichas consta de 4 páginas, con la información obtenida en la fase I y presentada en el cuadro 5, más la información de detalle obtenida en la fase II y que se presenta en el cuadro 10.

Discusión

Previo a la realización de este estudio, no se contaba en Uruguay con un estudio de estas características adaptado y aplicado a la realidad nacional. La metodología desarrollada fue llevada adelante con un equipo interinstitucional de técnicos nacionales, aplicando software de uso libre e información oficial disponible en el MTOP y en otras entidades estatales, como el IDE y el SINAE.

En contrapartida, la aplicación de un modelo global como SSBN hubiera implicado una importante erogación para la Administración. Adicionalmente, el equipo está en condiciones de abordar otros desafíos análogos, en virtud de la experiencia adquirida.

Cuadro 10. Manchas de inundación, matriz de riesgos y costos



Cuadro 10. Manchas de inundación, matriz de riesgos y costos (continuación)

Parao

Ruta 18- km 342,3

Costos Asociados - Tr 100				Costos Asociados - Tr 500			
Población y vivienda				Población y vivienda			
Viviendas afectadas	27			Viviendas afectadas	38		
Habitantes afectados	86			Habitantes afectados	122		
Costo total	U\$S 1.249.000			Costo total	U\$S 1.740.230		
Educación				Educación			
Escuelas afectadas	-			Escuelas afectadas	-		
Costo total	U\$S 0			Costo total	U\$S 0		
Salud				Salud			
Centros afectados	-			Centros afectados	-		
Costo total	U\$S 0			Costo total	U\$S 0		
Transporte				Transporte			
Rutas afectadas	Ruta 8	Ruta 18	Ruta91	Rutas afectadas	Ruta 8	Ruta 18	Ruta91
Distancia	0,30 km	2,10 km	1,6 km	Distancia	0,30 km	2,30 km	1,8 km
TPDA	1104	1102		TPDA	1104	1102	
# Autos	728	703		# Autos	728	703	
# Buses	34	39		# Buses	34	39	
# Camiones pesados	117	148		# Camiones pesados	117	148	
# Camiones medianos	196	176		# Camiones medianos	196	176	
# Camiones livianos	29	36		# Camiones livianos	29	36	
Costo total	U\$S 44.567			Costo total	U\$S 50.138		
Evacuación y realojos				Evacuación y realojos			
Centros deportivos				Centros deportivos			
Costo total	U\$S 18.600			Costo total	U\$S 22.560		
Cultivos				Cultivos			
Área arroz afectada	6,70 km2			Área arroz afectada	10,1 km2		
Área secano afectada	0,17 km2			Área secano afectada	0,22 km2		
Costo total	U\$S 1.052.200			Costo total	U\$S 1.577.000		
Ganadería				Ganadería			
Producción de carne	Cabezas de ganado	3106		Producción de carne	Cabezas de ganado	3537	
Costo total	U\$S 3.844.600			Costo total	U\$S 4.378.500		
Caminos y Carreteras				Caminos y Carreteras			
# Cargas que no llegan a destino (ton)	20446			# Cargas que no llegan a destino (ton)	20446		
Duración de corte + reparación	8			Duración de corte + reparación	9		
Costo total	U\$S 1.229.200			Costo total	U\$S 1.321.500		
Costo total asociado al evento				Costo total asociado al evento			
U\$S 7.438.300				U\$S 9.089.900			
Costos Asociados - Tr 100				Costos Asociados - Tr 500			
Población y Vivienda	U\$S 1.249.000			Población y Vivienda	U\$S 1.740.230		
Educación	U\$S 0			Educación	U\$S 0		
Salud	U\$S 0			Salud	U\$S 0		
Transporte	U\$S 44.567			Transporte	U\$S 50.138		
Caminería y Carreteras	U\$S 1.229.200			Caminería y Carreteras	U\$S 1.321.500		
Evacuación y Realojos	U\$S 18.600			Evacuación y Realojos	U\$S 22.560		
Cultivos	U\$S 1.052.200			Cultivos	U\$S 1.577.000		
Ganado	U\$S 3.844.600			Ganado	U\$S 4.378.500		

Fuente: Grupo Resiliencia Vial al Cambio Climático GReV-CC, pp.105-106 (2020a).

Conclusiones

El proyecto que se ha presentado ha permitido desarrollar una metodología efectiva para analizar el riesgo de eventos hidrometeorológicos, basada en el uso de software libre. Se cuenta con el análisis de detalle de 20 obras de arte viales en cuanto a su vulnerabilidad ante ese tipo de eventos, que puede replicarse para otras obras que fueran de interés o ampliarse a otros tipos de obras. Este estudio podría detallarse más aún (sobre todo en lo que hace a la fase II), incorporando análisis adicionales; por ejemplo, si se determina la granulometría del material del lecho, puede estimarse/calcularse la socavación esperable asociada a cada evento, empleando datos históricos de nivel y curvas de aforo disponibles.

Aunque hay mucho por hacer hasta lograr una metodología estandarizada para realizar este tipo de análisis, la opción de apostar al trabajo con la Universidad ha sido, una vez más, exitosa y costo-eficiente.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Ministerio de Transporte y Obras Públicas por autorizar la publicación de este trabajo.

También agradecen sinceramente a todos los integrantes del Grupo Resiliencia Vial al Cambio Climático, el equipo interinstitucional que llevó adelante este proyecto: por el MTOP, Arq. Rafael Ferrando, Mag. Ing. Hebenor Bermúdez, Mag. Ing. Gabriela Acosta†; y por el DIA-IMFIA (FING-UdelaR), Ing. Malena López Parard, Ing. Micaela Luzardo e Ing. Juan Ignacio Pais.

Referencias

- Banco Mundial y Oxford Analytics (2019). *SSBN Global Flood Hazard, reporte ad hoc para Uruguay*.
- Cardona, O.D., M.K. van Aalst, J. Birkmann, M. Fordham, G. McGregor, R. Perez, R.S. Pulwarty, E.L.F. Schipper, y B.T. Sinh (2012). Determinants of risk: exposure and vulnerability. En: *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, pp. 65-108
- EXCIMAP (European exchange circle on flood mapping) (2007). *Handbook on good practices for flood mapping in Europe*.
- Gabriel-Martin, I., Sordo-Ward, A., Garrote, L. y Granados, I. (2019). Stochastic Assessment of the Influence of Reservoir Operation in Hydrological Dam Safety through Risk Indexes. *Proceedings*, 7 (12), doi: 10.3390/ECWS-3-05811.
- Grupo Resiliencia Vial al Cambio Climático (2019). *Informe: Fase I*. 23 pp. MTOP - FJR, Montevideo, Uruguay.
- Grupo Resiliencia Vial al Cambio Climático (2020a). *Producto 2: Análisis de detalle de veinte puentes*. 143 pp. MTOP - FJR, Montevideo, Uruguay.

- Grupo Resiliencia Vial al Cambio Climático (2020b). *Producto 3: Planes de Contingencia*. 67 pp. MTOP – FJR, Montevideo, Uruguay.
- Nicolini, A. y Souto, F. (octubre, 2017) *Puente sobre el Canal Andreoni (Ruta 9)*. 11º Congreso de la Vialidad Uruguaya. Montevideo, Uruguay.
- Nixon, Steve; Horn, Jennifer; Hödl-Kreuzbauer, Edith; ter Harmsel, Arjan; Van Erdeghem, Dominique; Dworak, Thomas (2016). *European Overview Assessment of Member States' reports on Preliminary Flood Risk Assessment and Identification of Areas of Potentially Significant Flood Risk*. Luxembourg: Publications Office of the European Union. doi: 10.2779/576456
- Papaioannou, G., Loukas, A. y Vasiliades, L. (2019). Flood risk management methodology for lakes and adjacent areas: The Lake Pamvotida Paradigm. *Proceedings*, 7 (21), doi: 10.3390/\$ECWS-3-05825
- Silveira, L.; Genta, J.L.; Charbonnier, F.; Failache, N. y Alonso, J. (2000). *Directivas de diseño hidrológico – hidráulico de alcantarillas*. Universidad de la República, Facultad de Ingeniería, IMFIA; Ministerio de Transporte y Obras Públicas, Dirección Nacional de Vialidad. Uruguay.
- SINAE (2014). *Informes de consultorías Generación de conocimientos en Gestión Integral del Riesgo. Guía 6*.
- SINAE (2018). Base de datos de emergencias en la República Oriental del Uruguay (planilla electrónica).
- The World Bank (2018). *Coulibistrie Research Report. Document: 004, Version 01. Dominica - Reducing Debris and Flow Risk for Infrastructure Resilience, (Part of Improving the Resilience and Affordability of Roads and Bridges)*.
- Unión Europea (2007). *Directiva 2007/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2007, relativa a la evaluación y gestión de los riesgos de inundación*.
- US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center (2016). *HEC-RAS River Analysis System. User's Manual, Version 5.0*.
- US-NRCS (United States Natural Resources Conservation Service) (1985). *National Engineering Handbook, Section 4, \Hydrology (1985 & posteriors)*.
- Veleda, S., Martínez-Graña, A., Santos-Francés, F., Sánchez-San Roman, J. y Criado, M. (2017). Analysis of the Hazard, Vulnerability, and Exposure to the Risk of Flooding (Alba de Yeltes, Salamanca, Spain). *Appl. Sci.* 7 (157), doi: 10.3390/app7020157