

APLICACIÓN DE UN MODELO DE VULNERABILIDAD DE PUENTES SOBRE CAUCES FRENTE A AVENIDAS A 100 CASOS DE LA RED DE CARRETERAS ESPAÑOLA

F.J. Vallés Morán & J.B. Marco Segura
Dto. de Ingeniería Hidráulica y M. Ambiente, Univ. Politécnica de Valencia, España
fvalmo@hma.upv.es, jbmarco@hma.upv.es

G. Arias Hofman
INES Ingenieros, España
gah@inesingenieros.com

F.J. Rodríguez Benlloch
ETSI de Caminos, Canales y Puertos, Univ. Politécnica de Valencia, España
jvrodriquezb@gmail.com

RESUMEN

Las inundaciones que suceden cada año en cualquier parte del mundo y sus terribles consecuencias, ponen de manifiesto la importancia de contar con una metodología de control sobre la situación en que se encuentran las estructuras que salvan cursos de agua. Esto permitiría anticiparse a las catástrofes o limitar sus efectos, priorizar las actuaciones y disponer de una visión del conjunto de las estructuras, aspecto determinante en la Gestión de Puentes.

En este artículo se presenta una metodología original para la cuantificación de la vulnerabilidad de puentes sobre cauces frente a avenidas fluviales basada en inspecciones de campo. Posteriormente la metodología se aplica a 100 casos de la red de carreteras española gestionada por el Ministerio de Fomento.

La metodología cuantifica la vulnerabilidad frente a avenidas de los puentes sobre cauces en base a tres descriptores, dos para el cauce y uno para el puente. Éstos se obtienen a partir de una serie de parámetros y aspectos que derivan de la inspección de campo. En ésta se contemplan todos los datos necesarios relativos a los factores determinantes de la interacción cauce-puente en avenida. Finalmente, los tres descriptores se unifican obteniendo el Descriptor Global del Puente, que sintetiza toda la información.

ABSTRACT

The flooding that occurs every year all over the world, together with its terrible consequences, highlights the importance of a methodology to control the state of structures over stream beds. This methodology would allow catastrophes to be anticipated and their effects to be limited, and it would also serve to establish priorities and provide a global view of the structures (a fundamental aspect of bridge management).

This article presents an original methodology that serves to establish the vulnerability of bridges over stream beds against flooding on the basis of field inspections. The methodology was later applied to 100 cases of the Spanish road network managed by the Public Works Ministry.

The methodology establishes the level of vulnerability of the bridges against flooding by means of three descriptors: two for the bed and one for the bridge. These descriptors are derived from a series of parameters and aspects obtained during the supporting field inspection. This field inspection includes all the data regarding the most important factors

involved in the bed-bridge interaction during flooding. The three descriptors are finally joined to obtain the Global Bridge Descriptor, which summarises all the information.

1. INTRODUCCIÓN

La existencia y aplicación de una metodología de control sobre la situación en que se encuentran los puentes que, como pieza clave de las infraestructuras viarias, salvan cursos de agua conectando y cohesionando el territorio, parece necesaria a la vista de las catastróficas consecuencias que tienen las grandes avenidas de agua en las infraestructuras [2, 3]. Este tema ha sido tradicionalmente abordado analizando la situación frente a la socavación de una estructura determinada, en un momento concreto, casi siempre, como consecuencia de un suceso extraordinario que ha supuesto un claro peligro o incluso el colapso de la misma. Esta manera de actuar no permite anticiparse a las catástrofes o limitar sus efectos [4]; tampoco priorizar las actuaciones ni disponer de una visión del conjunto de las estructuras, aspecto que es determinante en la gestión de puentes.

En los últimos años, la UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA e INES INGENIEROS (en las fases preliminares también tuvo participación Torroja Ingeniería), bajo el auspicio del MINISTERIO DE FOMENTO, han desarrollado una metodología que permite cuantificar la vulnerabilidad de un puente frente a la acción del cauce en situación de avenida, a partir de una sencilla toma de datos de campo. Esta metodología se ha calibrado y validado mediante su aplicación y contraste en 100 puentes de la red de carreteras española, en el marco de un Sistema de Gestión de Puentes con el que el Ministerio gestiona sus obras de paso.

Es bien cierto que la acción erosiva local del río supone uno de los mayores retos para los puentes que salvan cursos fluviales, pero no es el único. Existen otros problemas hidráulicos asociados a la interacción cauce-puente en situación de avenida [6]. Entre estos problemas podemos citar los asociados a: una capacidad hidráulica insuficiente, las acciones hidrodinámicas del flujo sobre la estructura (incluso impacto de objetos/materiales arrastrados), la erosión general (migración lateral, incisión, ...), la erosión por contracción y finalmente sí, la socavación de pilas y estribos.

Todo ello pone de manifiesto el interés del desarrollo de una metodología que, contemplando la interacción cauce-puente en avenida de manera integral, permita cuantificar la vulnerabilidad de cada uno de los puentes de una red de infraestructuras viarias, de forma que con actuaciones menores puedan evitarse problemas mayores y además, pueda establecerse una priorización de las actuaciones en función de dicha vulnerabilidad [7].

En este artículo, se presenta de manera sintética esta metodología original que constituye una nueva herramienta para la cuantificación de la vulnerabilidad de los puentes sobre cauces frente a avenidas fluviales. Posteriormente a su presentación, se aplica a un conjunto de 100 casos, de diferentes tipologías estructurales, de la red de carreteras española y se analizan los resultados obtenidos. De manera previa, en los apartados que siguen, se realiza una caracterización tanto de los puentes de la red de carreteras española como de la muestra de puentes inspeccionados que ha servido de base para el desarrollo de la metodología que se propone.

2. CARACTERIZACIÓN DE LOS PUENTES DE LA RED DE CARRETERAS ESPAÑOLA

El objetivo de este punto es poner de manifiesto que con la muestra de puentes inspeccionados (apartado siguiente) ha sido cubierto en su práctica totalidad el espectro de casos posible así como, el de posibilitar el análisis de la posible representatividad de la muestra, no en términos estadísticos pero sí en términos tipológicos, es decir, en cuanto al peso relativo de las diferentes tipologías de puentes analizados.

En cuanto a la evolución de la Red de Carreteras del Estado (RCE), según datos oficiales de la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento, se puede reseñar que en los últimos tiempos casi se ha duplicado la red de gran capacidad (autopistas y autovías) mientras que, la red convencional se ha mantenido prácticamente constante. Así, hemos pasado de unos 5.400 km en el año 1992 a casi 10.800 en el 2008. Por el contrario, la red convencional se mantiene prácticamente constante en torno a unos 15.000 km, con una ligera tendencia decreciente en el periodo. Esta evolución de la longitud de la RCE por tipo de vía, debe en principio suponer o al menos así cabe esperarlo -por el crecimiento del peso específico de las estructuras de las nuevas vías de gran capacidad-, una mejoría en el comportamiento global del conjunto de puentes de la red desde el punto de vista de su vulnerabilidad. Este hecho debiera poder ser confirmado, en su caso, con la aplicación masiva de metodologías como la propuesta.

La distribución de la población de puentes de la RCE, en cuanto a Clase de Estructura – que alude a sus dimensiones o funcionalidades- y Tipología –referida a sus características resistentes-, se muestra en la Figura 1 siguiente.

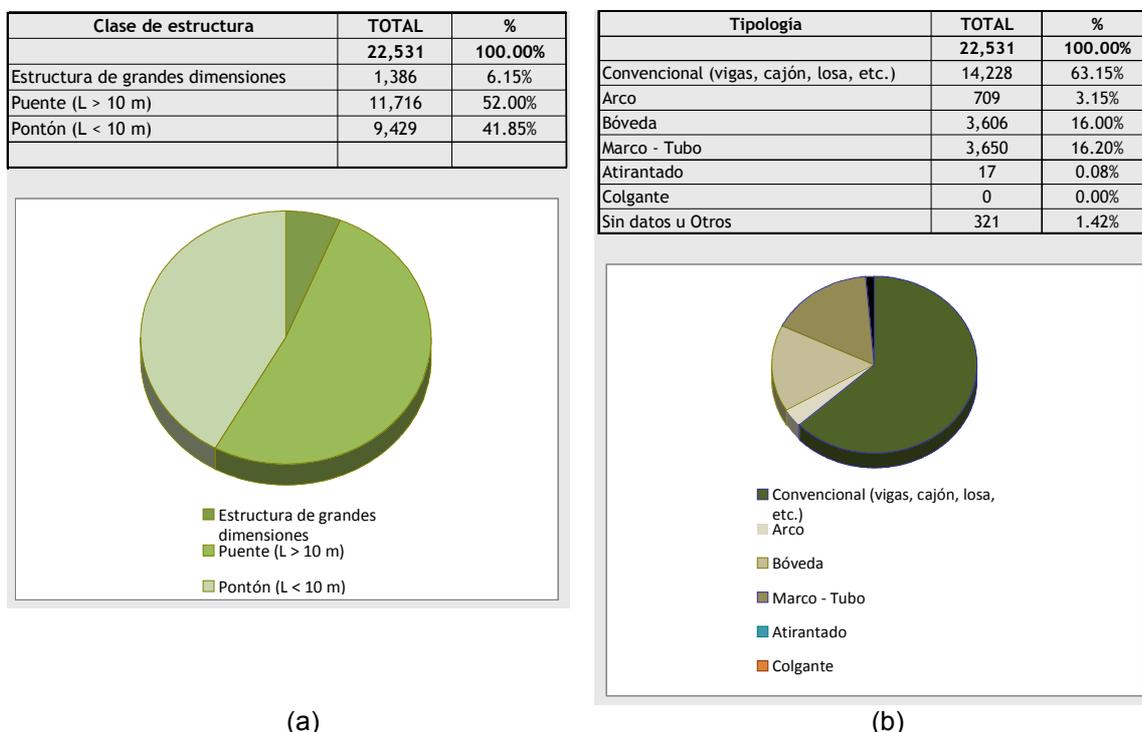


Figura 1 - Distribución de los Puentes de la RCE. (a) por Clase de Estructura; (b) por Tipología.
Fuente datos: Ministerio de Fomento.

Por tipología resistente convencional, se entienden los puentes de tablero de vigas, en cajón, losa, etc. o, según otras clasificaciones, de tramos isostáticos, hiperestáticos, de tipo pórtico y pérgolas. La distribución de los puentes convencionales de la RCE según

esta última clasificación, se presenta en la Figura 2. Según estimaciones del propio Ministerio de Fomento, el porcentaje de puentes sobre cauces sobre el total de puentes de la RCE, está en torno al 40 %. De tal manera que, el subconjunto de puentes fluviales debe estar compuesto por unos 9000 casos. A estos iría dirigida la nueva metodología que se plantea.

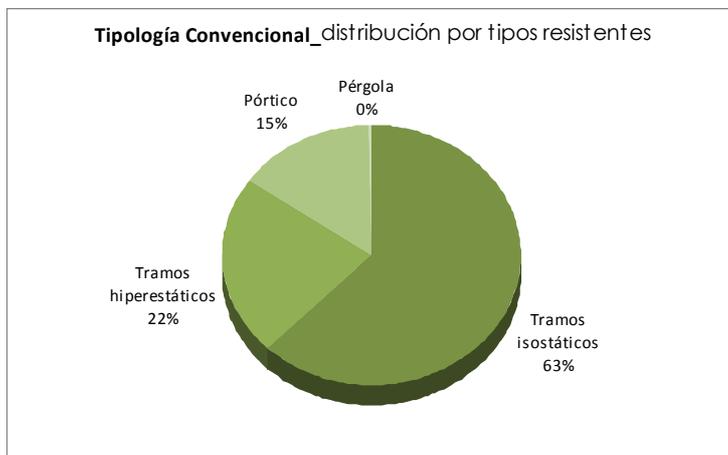


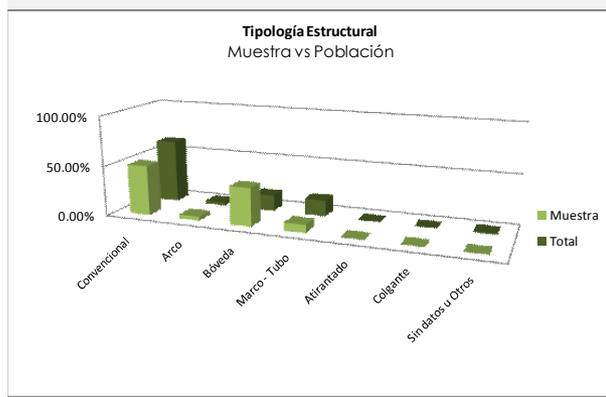
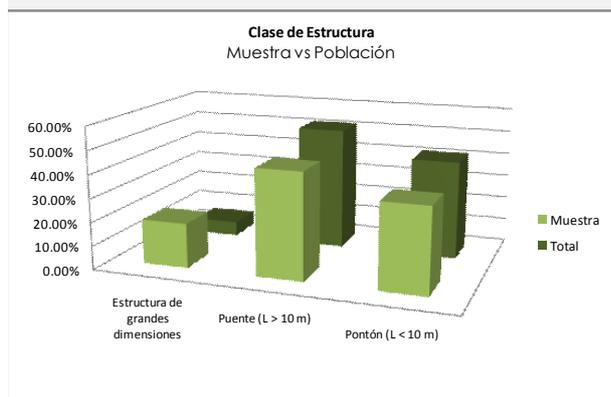
Figura 2 - Distribución tipológica de los puentes convencionales de la RNCE.

3. LA MUESTRA DE PUENTES INSPECCIONADOS. DESCRIPCIÓN Y ANÁLISIS COMPARATIVO CON LOS PUENTES DE LA RED NACIONAL DE CARRETERAS

En relación a la muestra, la situación es bien diferente. La distribución por clase de estructura y tipología, comparada con la población, puede verse en la Figura 3.

Clase de estructura	Muestra	%	TOTAL	%
	100	100.00%	22,531	100.00%
Estructura de grandes dimensiones	19	19.00%	1,386	6.15%
Puente (L > 10 m)	45	45.00%	11,716	52.00%
Pontón (L < 10 m)	36	36.00%	9,429	41.85%

Tipología	Muestra	%	TOTAL	%
	100	100.00%	22,531	100.00%
Convencional	50	50.00%	14,228	63.15%
Arco	4	4.00%	709	3.15%
Bóveda	38	38.00%	3,606	16.00%
Marco - Tubo	8	8.00%	3,650	16.20%
Atirantado	0	0.00%	17	0.08%
Colgante	0	0.00%	0	0.00%
Sin datos u Otros	0	0.00%	321	1.42%



(a)

(b)

Figura 3 - Distribución Comparativa de los Puentes de la Muestra y de la RCE: (a) por Clase de Estructura; (b) por tipología estructural.

Así, en la muestra, el porcentaje de 'estructuras de grandes dimensiones' es muy superior al de la población (19 frente a 6.2), el de 'pontones' –luz menor de 10 m- es parecido, mientras que, el de 'puentes' es algo inferior en la muestra, 45 % frente a 52 %. Se entiende, en esta clasificación, por estructura de grandes dimensiones, aquella que

cumple alguna de las siguientes condiciones: luz máxima de vano mayor de 40 m; altura máxima de pila mayor de 25 m; o, longitud total mayor de 100 m. Desde el punto de vista de la tipología resistente, lo más reseñable es por un lado, la disminución del peso relativo de los puentes convencionales en la muestra respecto de la población –un 13 % menos-, por otro y muy importante, el notable incremento del porcentaje de bóvedas en la muestra respecto del correspondiente en la población –un 38 % frente a un 16 %-, y finalmente, el menor peso específico de la tipología denominada Marco-Tubo, en la muestra un 8 % respecto de un 16 % en la población, es decir, la mitad. No obstante, esto último es fácilmente explicable, puesto que suelen ser de luces inferiores a 5 m, y el criterio de inspección de cauce es que tengan, al menos, 6 m de luz.

Las tipologías menores, solamente en cuanto a presencia o número de estructuras, tienen un peso relativo muy poco significativo tanto en la muestra como en la población. Piénsese que las tipologías aludidas en el párrafo anterior, representan el 96 % del total de la muestra o el 95 % del total de la población.

Por tanto y en este último sentido, se puede señalar que la muestra considerada no sólo es importante en número de puentes fluviales analizados, sino también en cuanto a la representatividad tipológica de los puentes en ella incluidos. No obstante, insistimos en la elevada importancia que en la muestra tienen los puentes bóveda (los normalmente conocidos como puentes de fábrica) lo que sin duda redundará en una penalización importante a la hora de evaluar los resultados obtenidos en la muestra como conjunto de datos, es decir, desde un punto de vista global. Este hecho debe por tanto alejar cualquier atisbo de tentación en cuanto a una posible extrapolación de las conclusiones obtenidas sobre la muestra, al conjunto de la población.

4. NUEVA METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD DE PUENTES SOBRE CAUCES FRENTE A AVENIDAS FLUVIALES. PRESENTACIÓN Y SÍNTESIS

La metodología que se propone, se basa en el análisis de un número importante de puentes inspeccionados y en la experiencia profesional tanto en la inspección, incluso forense (puentes colapsados), como en el desarrollo de estudios clásicos y proyectos de reparación de puentes; y se sustenta en los principales factores intervinientes en la interacción cauce-puente en situación de avenida [5]. No requiere la realización de simulaciones hidrológico-hidráulicas ni estructurales –enfoque clásico y tremendamente costoso para implantar en el seno de un Sistema de Gestión de Puentes-, basando la obtención de sus descriptores o indicadores de vulnerabilidad, en una toma de datos en campo. Datos que serán posteriormente utilizados en gabinete hasta llegar a un valor numérico final único. Los datos recolectados en la inspección de campo son los estrictamente necesarios.

Esta nueva metodología cuantifica la vulnerabilidad frente a avenidas de los puentes sobre cauces en base a tres descriptores, dos para el cauce – el Descriptor del Cauce de Aguas Arriba y el Descriptor del Cauce de Aguas Abajo-, y uno para el puente – el Descriptor del Puente-, que deben ser utilizados conjuntamente. Estos descriptores se obtienen, como es sabido, a partir de una serie de parámetros y aspectos que se derivan de la inspección de campo en la que se apoya. En ella se recopilan de manera sistemática y objetiva todos los datos necesarios para la consideración de los factores determinantes de la interacción cauce-puente en avenida, sobre los que se sustenta el correspondiente proceso de cálculo posterior. Estos factores son de tipo geomorfológico, hidráulico-sedimentológico y estructural. Los factores geomorfológicos están referidos

principalmente a propiedades del cauce y de sus márgenes. Sus características y efectos se consideran muy importantes para el análisis de los problemas de estabilidad del puente asociados a la interacción con el cauce en situación de avenidas. Los factores hidráulico-sedimentológicos tienen una importancia significativa en la evaluación de la vulnerabilidad fluvial de los elementos subestructurales del puente. De ellos depende en gran medida el tipo de interacción que se produzca entre puente y cauce, y por ende, los efectos que de ésta se desprendan. Evalúan problemas asociados a falta de capacidad hidráulica; a la estabilidad fluvial en las inmediaciones de la estructura, la erosión por contracción y la socavación; y a las acciones hidrodinámicas del flujo sobre la propia estructura. Finalmente, los factores estructurales están relacionados con las características resistentes, aunque en ocasiones también durables, principalmente de los elementos de la subestructura y sus cimentaciones, incluidas las medidas de protección de las mismas.

Se diseña por tanto una nueva inspección [8], la Inspección Fluvial, que se establece como aquella inspección in situ de puentes sobre cauces realizada desde el punto de vista de la interacción avenida-cauce-estructura, considerando todos los factores intervinientes, tanto geomorfológicos, como hidráulico-sedimentológicos y estructurales, fundamentales para evaluar la vulnerabilidad del puente frente a avenidas. Para la realización de la misma, en el marco de las Inspecciones Principales, se diseñan las Fichas de Inspección Fluvial de Puentes y el correspondiente Manual de Inspección de Puentes sobre Cauces. Las fichas de inspección contemplan toda la información necesaria para la posterior aplicación automática de la metodología de evaluación original que se propone.

Los descriptores del cauce, se determinan en base a unos códigos globales con los que se valoran los cauces fluviales. Así, el DESCRIPTOR DEL CAUCE DE AGUAS ARRIBA está compuesto por seis cifras (4 enteras y 2 decimales) o dígitos del descriptor de cauce – DDC-, que reflejan el estado del cauce de acuerdo con la valoración que el inspector haya evidenciado respecto de los aspectos (sus parámetros correspondientes se encuentran en la Ficha de Inspección) contenidos en la Tabla 1 siguiente.

Tabla 1 - Aspectos considerados en el Descriptor del Cauce de Aguas Arriba.

ASPECTOS EN DESCRIPTOR DEL CAUCE DE AGUAS ARRIBA	
1_	Índice de contracción
2_	Índice de obstrucción natural o artificial
3_	Localización, tipo y condiciones de las medidas de protección
4_	Fosas de socavación en lecho
5_	Tipo de cauce
6_	Potencial de bloqueo por objetos/materiales arrastrados

Con respecto al DESCRIPTOR DEL CAUCE DE AGUAS ABAJO, el procedimiento de cálculo será semejante, pero con los aspectos contenidos en la Tabla 2, formando un número de cinco cifras (3 enteras y 2 decimales) en lugar de seis.

Tabla 2 - Aspectos considerados en el Descriptor del Cauce de Aguas Abajo.

ASPECTOS EN DESCRIPTOR DEL CAUCE DE AGUAS ABAJO	
1_	Índice de obstrucción natural o artificial
2_	Localización, tipo y condiciones de las medidas de protección
3_	Fosas de socavación en lecho
4_	Tipo de cauce
5_	Índice de bloqueo por objetos/materiales existentes en el cauce

En cuanto al DESCRIPTOR DEL PUENTE (DP), el Código que define este descriptor indica la vulnerabilidad del puente, tanto en su estado actual como frente a futuros efectos desfavorables de procesos fluviales (hidráulico-sedimentológicos) tales como socavaciones, sedimentaciones o aterramientos, migración del cauce respecto al puente, empujes hidrodinámicos, entrada en carga por presión hidráulica, etc. Este Descriptor se valora según códigos (Tabla 3) y casos asociados a estos códigos, que representan combinaciones específicas de parámetros y/o aspectos establecidos para las unidades subestructurales del puente (US). Estas combinaciones representan condiciones de estado equivalente o situaciones de 'equivulnerabilidad'. Este Descriptor toma su valor dentro de un rango de códigos de entre 3 y 8, estando cada valor del rango, como se ha comentado, sujeto a un subconjunto de casos posibles. Se usa este tipo de valoración o estimación del Descriptor para obtener indicadores finales comparables a los utilizados en otros países [1].

Tabla 3 - Descriptor del Puente. Rango de Códigos.

CÓDIGO	CONDICIÓN. Descripción General de los Aspectos Principales.
N	No Aplicable. Indicado para puentes que no estén situados sobre cauces.
9	Excelente. De asignación solo por personal experto de oficina técnica. Puentes con gálibos elevados donde todas las US están por encima del caudal de avenida de 500 años de periodo de retorno.
8	Muy Buena. Indicado para puentes clasificados como Desagües Transversales o puentes con US cimentadas en roca competente.
7	Buena. Indica que las US están adecuadamente protegidas por las actuaciones de corrección o bien que éstas son innecesarias.
6	Satisfactoria. Indica las US que están en contacto con material de lecho en el que predominan cantos rodados y guijarros, y muestran una pequeña o ninguna evidencia de la inestabilidad. Deterioros menores.
5	Aceptable. Indicado para US en contacto con material del lecho en el que predominan cantos rodados y guijarros, y nos muestran evidencia de la inestabilidad del lecho. Deterioros y algo de socavación.
4	Pobre. Indica las US en contacto con material del lecho que consiste predominantemente en material degradable y fino. Pérdida de sección, socavación importante. Afecta a elementos fundamentales.
3	Deficiente. Indica las US que están en situación crítica con respecto a la socavación y/u obstrucción, de tal manera que la condición de socavación o aterramiento amenaza potencialmente a la estructura del puente. Peligro de colapso total.
2	Crítica. Grandes deterioros en elementos principales (socavación o aterramiento que puede colapsar dichos elementos, insuficiencia acusada de capacidad hidráulica). El puente está CERRADO.
1	Fallo Inminente. Grandes deterioros, pérdida de sección, gran socavación que afecta a la estabilidad estructural. Actuación de emergencia. Se evidencia la amenaza real a la estructura del puente. Se requiere ACTUACIÓN INMEDIATA.
0	Fallo. El Código 0 indica que el puente ha colapsado. Acciones de reconstrucción.
666	Información Insuficiente. Necesidad de evaluación por expertos.

Para que una US pueda ser valorada con un código, debe haberse inspeccionado (y por tanto debe disponerse de los correspondientes datos) in situ (y/o en gabinete) en al menos los parámetros o aspectos que se indican en la Tabla 4 siguiente.

En el caso de que una US se encuentre en una situación que lleva a más de un código, se siguen unos criterios de prioridad de manera que la asignación final corresponde al caso más desfavorable. Cada US se calificará con un solo código aunque puedan presentarse diferentes casos dentro del mismo. Si los datos recopilados resultan insuficientes o las condiciones de contorno locales impiden el cálculo del código de la US, deberá

codificarse con un 666. Esta situación indicará la necesidad de una posterior Inspección Especial en su caso y/o la intervención de expertos. En cuanto al DP, se tomará también el de más alta prioridad de entre las US valoradas (Figura 4). Dicha prioridad se corresponde con el número más bajo del rango de códigos. Además, para este descriptor que representa la condición de estado de la estructura, será también necesario haber podido calcular, si ha lugar, los valores del Índice de Obstrucción Global. Este índice, se calcula “bajo el puente”, y es suma de los correspondientes Índices de Obstrucción Natural y/o Artificial –barras, invasiones de cauce, edificaciones, vertidos consolidados, etc.- y de Bloqueo por Objetos/Materiales Arrastrados y existentes en el cauce.

Tabla 4 - Parámetros o aspectos a inspeccionar en el código de la US del puente.

PARÁMETROS O ASPECTOS A INSPECCIONAR PARA ESTABLECER EL CÓDIGO DE LA UNIDAD ESTRUCTURAL –US- DEL PUENTE	
1_	Tipo de US_ [tipo y material de pila, y tipo y material de estribo]
2_	Condición de Elemento_ [pila y/o estribo solo para el caso de daños graves, afección a su estado resistente, en códigos bajos]
3_	Ángulo de Ataque a la US_ [ángulo de ataque de pilas y estribos]
4_	Tipo de cimentación de la US_ [superficial, semiprofunda o profunda]
5_	Tipo de material del lecho junto (en las proximidades e inmediatamente próximo) a la US –lo ideal sería conocer el tipo de material de cimentación-
6_	Condiciones de socavación/aterramiento
7_	Tipo y Estado de conservación de las medidas de protección (protectoras-correctoras) de la US –si las hubiera-
8_	Evidencias de movimiento de la US_ [movimiento relativo de la US respecto al tablero del puente].

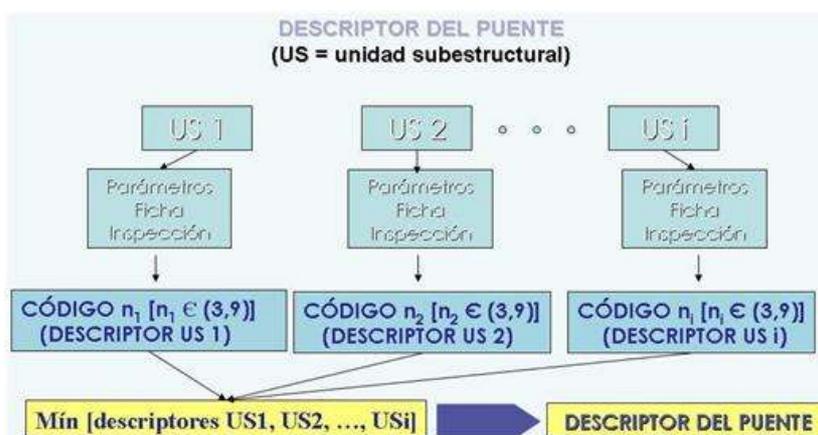


Figura 4 - Cuantificación final del Descriptor del Puente.

Para la estimación del DP, se establece la relación total y completa de casos físicamente posibles, en cuanto a las combinaciones específicas de valores de parámetros y/o aspectos establecidos para las US, el lecho y su condición en las proximidades de las mismas y las limitaciones –barras, obstrucciones y acumulaciones- que dan lugar a uno u otro valor del Índice de Obstrucción Global. Posteriormente, esta relación de casos –agrupaciones o combinaciones específicas de aspectos relacionados con la vulnerabilidad del puente fluvial frente a avenidas-, se agrega según su CONDICIÓN en CÓDIGOS (ver Tabla 3 anterior).

El conjunto de descriptores básicos considerado se muestra en la Figura 5 siguiente.

	Índice de Contracción	Índice de Obstrucción	Medidas de Protección	Fosas de Socavación Lecho	Tipo de Cauce	Potencial / Índice de Bloqueo
Descriptor del Cauce de Aguas Arriba_	#	#	#	#	#	#
Descriptor del Cauce de Aguas Abajo_		#	#	#	#	#
Descriptor del Puente_						N

Figura 5 - Descriptores básicos de vulnerabilidad empleados.

Finalmente, combinando en primera instancia los dos primeros descriptores (para obtener el Descriptor del Cauce) y unificando posteriormente ese indicador común del cauce así obtenido con el Descriptor del Puente, se llega a obtener un valor único, que permite la comparación de la situación de vulnerabilidad entre unos puentes y otros. Este descriptor único es el denominado DESCRIPTOR GLOBAL DEL PUENTE [DGP], que condensa y sintetiza toda la información. Este valor único, el DGP, varía para puentes en funcionamiento entre 3 (condición que presenta deficiencias serias) y 8 (condición muy buena). Esto se hace así para optimizar el tratamiento de la información dentro de un Sistema de Gestión de Puentes (p.e de la Red Nacional de Carreteras). Para facilitar su obtención así como el manejo del importante volumen de resultados que se genera al analizar multitud de casos, se diseña un ábaco, el Ábaco del DGP (Figura 6). Este ábaco supone una importante herramienta de gestión, pues ofrece no sólo el valor del DGP actual sino que indica cuál sería la ruta o camino óptimo –desde el punto de vista de las actuaciones necesarias, de ingeniería fluvial o estructurales- para su mejora (aumento de valor) y por tanto para la de la condición de estado del puente al disminuir su vulnerabilidad.

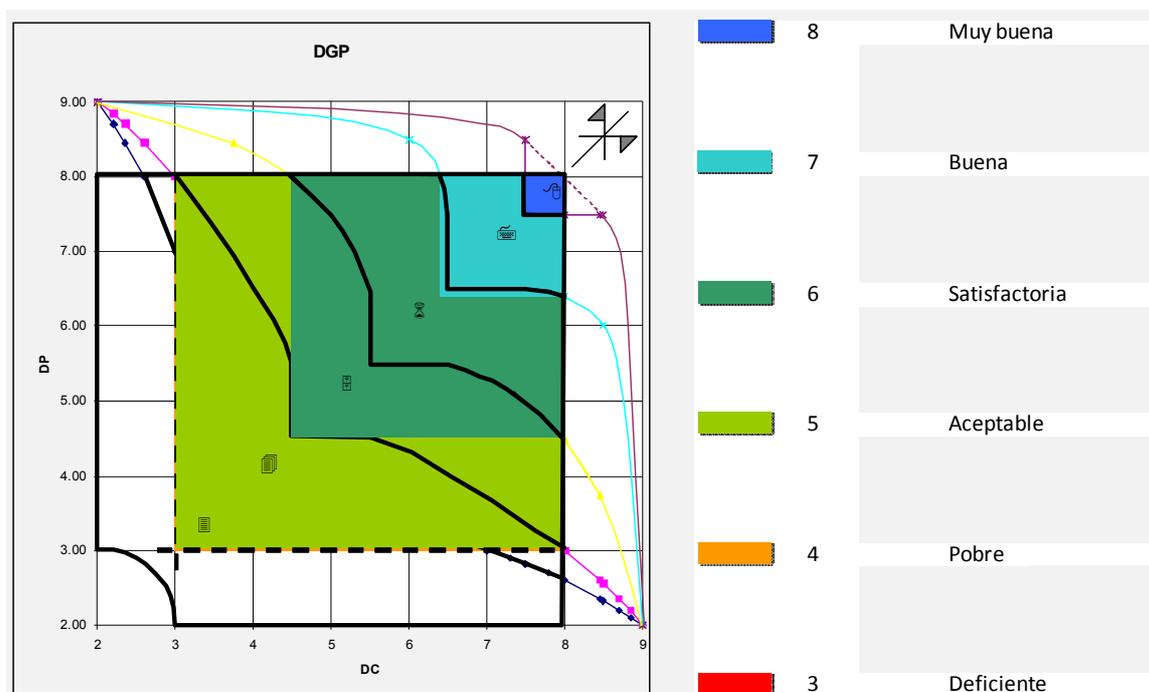


Figura 6 - Ábaco del Descriptor Global del Puente [DGP].

Además, después de la obtención de los correspondientes descriptores en un determinado conjunto de casos reales, si por el motivo que fuera, por ejemplo por limitación presupuestaria, se requiriese elegir de entre todos, los 'n' peores y que por tanto necesitasen una actuación más inmediata o urgente, la propia metodología los podría ordenar, incluso dentro de cada región de vulnerabilidad considerada en el ábaco propuesto. Así, dentro de la región 3, la correspondiente a los casos con peor condición de estado y por tanto de máxima vulnerabilidad, estimándose ésta igual para todos los casos dentro de ella, lo que sí es cierto es que la prioridad de actuación o la inmediatez con que se exige intervenir, no es la misma para todos. En la Figura 7 se plasma la recomendación general en cuanto a priorización de actuaciones dentro de la región 3 del ábaco, la que denota peor condición de estado. Este recorrido en zig-zag dentro de la región, es la recomendación con carácter general y siempre que no se haya tomado, porque la gravedad del caso así lo aconseje, la decisión de pasar ningún puente a Código 2 (Condición Crítica; DGP=2) o incluso a Código 1 (Fallo Inminente; DGP=1), lo que obviamente haría que dicho puente o puentes pasaran a ser los prioritarios, conllevando tales códigos, la puesta fuera de servicio y la actuación inmediata.

Análogamente ocurriría para el resto de regiones del ábaco, donde los casos de mayor inmediatez se encuentran también en la diagonal del ábaco y por tanto en el vértice de cada región. El recorrido de priorización de actuaciones sería también en zig-zag de derecha a izquierda, como se muestra en la Figura 7 para la región 3 del ábaco.

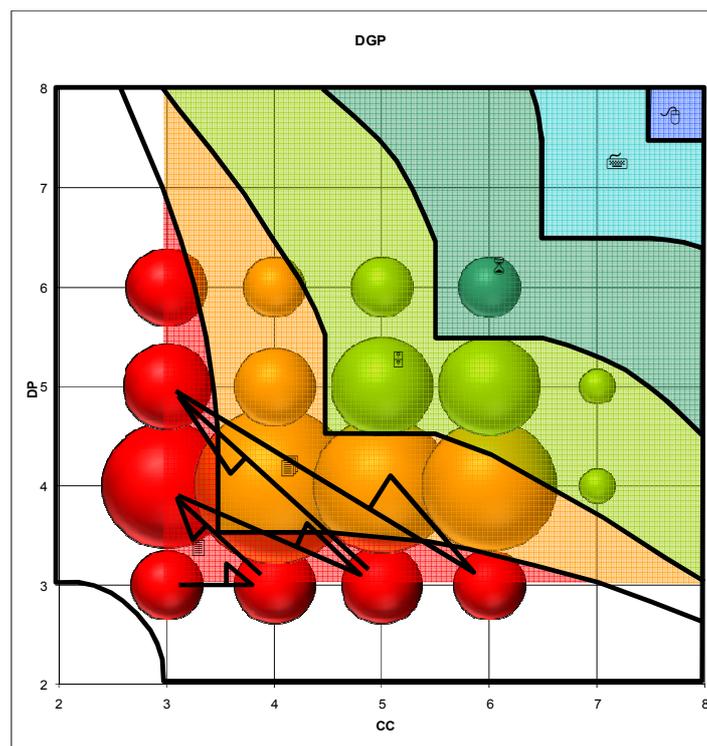


Figura 7 - Priorización de las Actuaciones dentro de las regiones del Ábaco del DGP. Caso de la Región 3.

Con posterioridad a su desarrollo, la metodología original que se propone ha sido contrastada frente a un conjunto de casos reales de puentes que, o bien han sido estudiados desde un punto de vista clásico o bien han colapsado, mostrando resultados plenamente satisfactorios. Esto ha permitido finalmente validar el proceso de unificación propuesto para los tres descriptores y por tanto la obtención del DGP como indicador final único.

5. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Para la aplicación automática de la metodología propuesta, se ha preparado una hoja de cálculo que, en primer lugar procesa la información de inspección para cada puente, detectando errores formales e inconsistencias y, en segundo lugar, realiza los oportunos cálculos (relaciones dimensionales, índices de contracción, ...) para la obtención de cada uno de los DDC y por ende de los propios descriptores del cauce y verificaciones en cuanto a pertenencia o no de un determinado caso real en estudio a un determinado caso de equivulnerabilidad y por agregación de estos últimos, a uno u otro código, para así obtener el Descriptor del Puente.

La hoja de cálculo dispone de una cabecera con información general del caso en estudio (igual que las fichas de inspección) y de un cuadro resumen con los valores obtenidos para los tres descriptores básicos (Figura 8). A partir de esa pantalla, la estructura de la hoja se divide en cuatro partes, a saber: Datos de Entrada, que corresponde a un 'volcado' de los datos de la Ficha de Inspección Principal de Cauce; Formulación Cauce Aguas Arriba, para el cálculo de este descriptor; Formulación Cauce Aguas Abajo, idem anterior; y, Formulación Puente, para la obtención del Descriptor del Puente.

Código del puente:	0N-0260-0176+850	Nombre del puente:	PUENTE SOBRE EL RIO SEGRE EN EL PK 176+850				Inspector:	TYPSA	
Carretera:	N-260	P.K.:	176+850	Provincia:	Gerona	Nº de Vanos:	3	Fecha de inspección:	15-jul-08
DESCRIPTORES									
DESCRIPTOR DEL CAUCE DE AGUAS ARRIBA		8	6	5	6	4	4	ORDEN SEGÚN DDC	
		*							
		5	6	6	8	4	4	ORDEN BASE DATOS	
DESCRIPTOR DEL CAUCE DE AGUAS ABAJO		7	5	4	4	8	ORDEN SEGÚN DDC		
		4	5	7	4	8	ORDEN BASE DATOS		
DESCRIPTOR DEL PUENTE		3	3	3	2	CÓDIGO MÍNIMO ESTRIBO			
						CÓDIGO MÍNIMO PILA			
						ÍNDICE OBSTRUCCIÓN GLOBAL			

Figura 8 - Hoja para el cálculo de los Descriptores de Vulnerabilidad. Información General y Cuadro Resumen de Resultados.

En los 100 casos analizados, bien por el conocimiento de toda la información, o al menos de toda la necesaria, o incluso en algunos, por la toma de la denominada 'decisión de gestión' –lo que ha sucedido en un 22% de los casos; en éstos, se ha asignado un tipo de cimentación superficial porque el inspector, en la ficha, ha indicado o bien que ésta es 'no definible' o 'no observable', la metodología ha sido finalista, es decir, ha conseguido cuantificar los tres descriptores básicos y por tanto y en base a ellos, la vulnerabilidad del puente frente a avenidas.

Una vez procesada toda la información de inspección y obtenidos los valores de los tres descriptores básicos considerados, se aborda el cálculo del Descriptor Global del Puente como indicador único. Para cada caso, el resultado final es el DGP y sus dos coordenadas en el Ábaco de Descriptor Global, es decir, el Descriptor del Cauce (DC o CC, que valora el cauce en el entorno de afección de puente, tanto de aguas arriba como

de aguas abajo), y el Descriptor del Puente (DP). En estos términos, el análisis general de resultados obtenidos puede observarse en la Figura 9. En la Figura 10 siguiente, se presenta el comportamiento del Descriptor Global del Puente.

En cuanto al Código del Cauce en la muestra de casos analizada, éste se distribuye básicamente entre los valores de 3 y 6, concentrándose el 50 % del total de casos analizados en cada mitad de ese intervalo, si bien el menor de los porcentajes es para el código más desfavorable (18 %). Al 30 % de los casos le corresponde una condición de pobre, mientras que el 26 % es aceptable y el 24 % restante tiene una condición satisfactoria. En el caso del Descriptor del Puente, su comportamiento presenta un claro sesgo hacia los valores que indican peor condición de estado, con una máxima concentración en el valor DP=4 (47 % de los casos con resultados). El 13 % de los casos estarían en una situación deficiente. Al 40 % de los casos correspondería una situación, bien aceptable o bien satisfactoria. No obstante, cabe recordar en este punto la influencia que finalmente tiene el haber adoptado, por falta de información, la decisión por ejemplo de asignar a una determinada estructura, una cimentación de tipo superficial. Esta influencia de la llamada ‘decisión de gestión’ en el DP tendrá también su reflejo directo en el valor final del DGP. Este asunto se analizará más adelante.

CÓDIGO DE CAUCE				DESCRIPTOR DEL PUENTE			
CC	CONDICIÓN	N	%	DP	CONDICIÓN	N	%
3	Deficiente	18	18.0%	3	Deficiente	13	13.0%
4	Pobre	30	30.0%	4	Pobre	47	47.0%
5	Aceptable	26	26.0%	5	Aceptable	27	27.0%
6	Satisfactoria	24	24.0%	6	Satisfactoria	13	13.0%
7	Buena	2	2.0%	7	Buena	0	0.0%
8	Muy Buena	0	0.0%	8	Muy Buena	0	0.0%
TOTALES		100	100.0%	TOTALES		100	100.0%

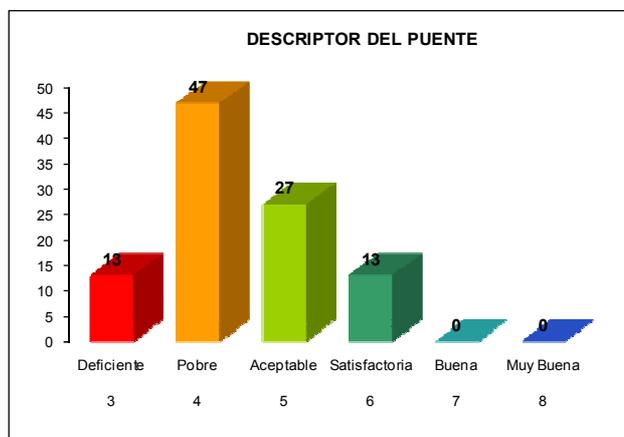
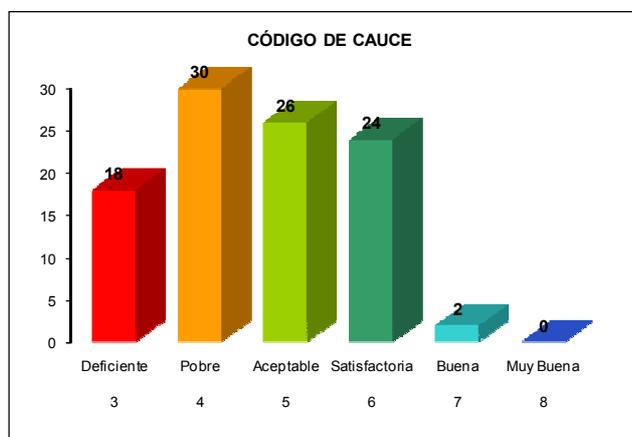


Figura 9 - Muestra de Casos Inspeccionados. DC y DP. Análisis de Resultados.

Ese comportamiento del DP, unido a que tan sólo existen dos casos con valores de 3 para los dos descriptores principales (CC y DP), y al hecho de que los dos tengan el mismo peso relativo, hace que el DGP tenga una distribución formalmente muy parecida, pero con un sesgo todavía más marcado hacia los valores inferiores del intervalo de condiciones de estado considerado. En este caso, el 29 % de los casos se encuentra en una condición de deficiente mientras que, se mantienen los casos con una condición pobre. El 24 % de los casos analizados estaría en una situación aceptable o satisfactoria.

La Figura 11 ilustra aquellos casos cubiertos por la muestra contemplada respecto del total de valores posibles para el DGP. Puede observarse como con la muestra se dispone de casos reales que cubren una importante porción del total de posibilidades. Mientras, la Figura 12 siguiente indica (tamaño de las esferas), el número exacto de puentes de la

muestra en una determinada posición dentro de cada una de las regiones posibles del ábaco (por código de colores), correspondientes a diferentes valores del DGP.

DESCRIPTOR GLOBAL DEL PUENTE			
DGP	CONDICIÓN	N	%
3	Deficiente	29	29.0%
4	Pobre	47	47.0%
5	Aceptable	21	21.0%
6	Satisfactoria	3	3.0%
7	Buena	0	0.0%
8	Muy Buena	0	0.0%
TOTALES		100	100.0%

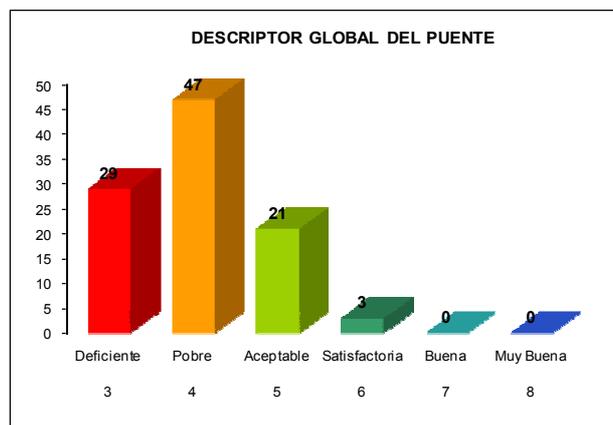


Figura 10 - Muestra de Casos Inspeccionados. DGP. Análisis de Resultados.

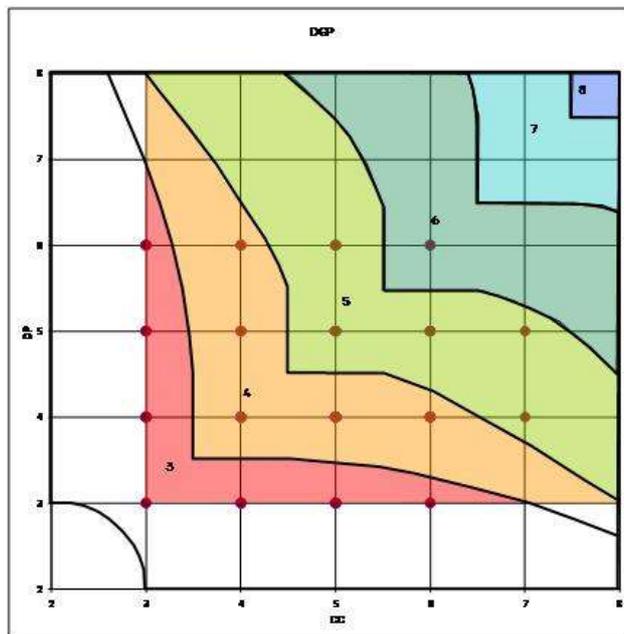


Figura 11 - Representación de Resultados sobre el Ábaco del DGP. Casos existentes en la muestra.

El desglose que se ha considerado en el análisis por tipologías, es coherente con la clasificación utilizada pero con el máximo grado de desagregación. Este desglose ha sido: Tramos Isostáticos, Tramos Hiperestáticos, Bóveda, Arco y Marco-Tubo (ODT). No se consideran más tipologías por su inexistencia en la muestra. Del análisis realizado en términos del DGP, cabe concluir fundamentalmente que: los puentes isostáticos se comportan de manera similar al total de la muestra; mientras que, las bóvedas son los puentes que peor comportamiento manifiestan. Sobre el resto de tipologías, la escasez de casos no permite extraer, a nuestro juicio, conclusión alguna.

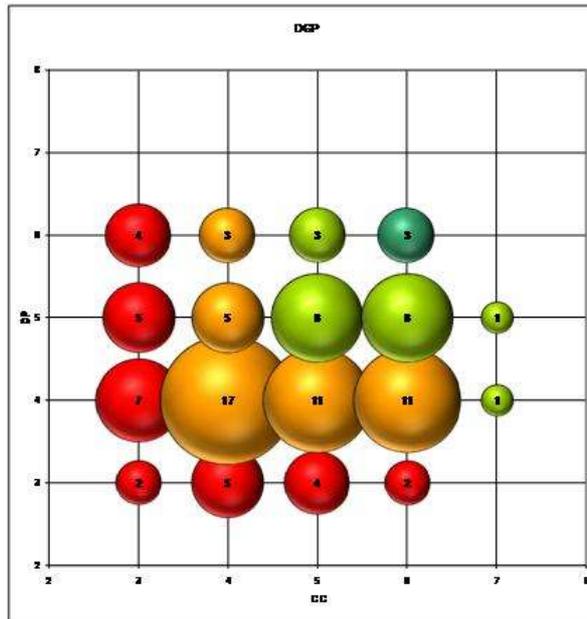


Figura 12 - Número de casos de la muestra analizada en cada región del Ábaco del DGP.

El caso de las bóvedas merece análisis aparte (Figura 13). Estas estructuras, más robustas, monolíticas y al mismo tiempo más frágiles, se comportan en general, mucho peor que el resto. Su mayor antigüedad, sus peores condiciones de cimentación y materiales constituyentes, así como sus mayores índices de contracción y obstrucciones al paso del flujo en avenidas, generan unos valores finales de los descriptores de vulnerabilidad más bajos y por tanto peores que en el resto de los casos. Su distribución se concentra básicamente en los valores de peor condición de estado, con un 40% de los casos en situación deficiente y un 50% con una condición de pobre, lo que entre ambos supone un 90% del total de casos de esta tipología. La elevada importancia de los puentes bóveda en la muestra (ver Apartado 3) y su comportamiento diferencial respecto al resto, suponen de hecho que no sea posible una extrapolación directa de los resultados del conjunto de casos analizados, a la población.

Finalmente y para cerrar el análisis, se evalúa dentro de la metodología propuesta, la influencia de la cimentación en la cuantificación final de la vulnerabilidad del puente frente a avenidas. En las fichas de inspección, se debe elegir entre alguna de las siguientes opciones: 1, superficial; 2, semiprofunda; 3, profunda; 4, no definible; y, #, no observable. Se indicará 'no definible' en caso de duda y, 'no observable', en caso de que no se pueda apreciar la cimentación o no se disponga del dato de proyecto.

Un tipo de cimentación superficial supone que la US (estribo, pila) se encuentre en un Código bajo, lo que supone en la práctica que el Descriptor del Puente rara vez supere el valor 4 (condición de estado Pobre), mientras que una cimentación semiprofunda o profunda no supone una limitación tan grave para un elemento de la subestructura. Esto se traduce en que si, por falta de datos, el gestor decide asignar a una determinada US un tipo de cimentación superficial, como criterio del lado de la seguridad, la condición de estado de la estructura basada en el DP, baja, lo que en no pocas ocasiones tiene su reflejo directo en el DGP como indicador final (Figura 14).

Este hecho ha ocurrido en 22 casos sobre 100 de la muestra analizada de puentes de la RCE. En la mayoría de los casos el hecho de haber considerado cimentación superficial ha supuesto una disminución del DP, mientras que en 10 de ellos además, ha rebajado el

valor final del DGP, respecto del hipotético valor correspondiente al caso de cimentación profunda. En el caso más extremo (Puente 069) el DGP pasaría de 6 a 4 si su cimentación fuera superficial, como consecuencia de un salto en el DP de 8 a 4. Este hecho tiene una trascendencia importante pues se está asumiendo que un puente dado tiene una condición final de estado representado por un DGP = 4, condición pobre, cuando podría ser en realidad un caso con una condición muy buena, DGP = 6.

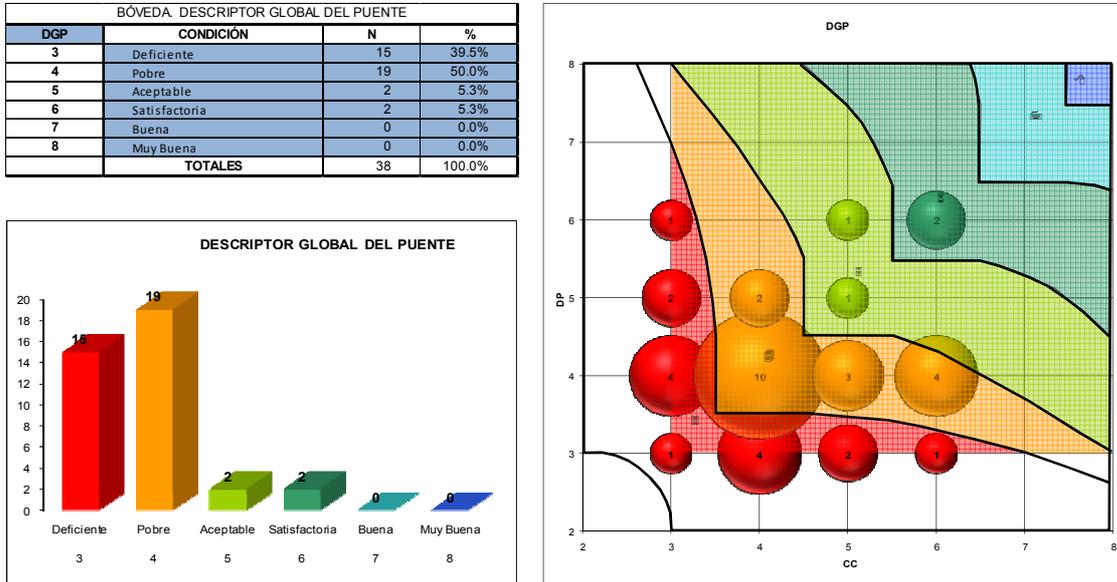


Figura 13 - Puentes Bóveda. Distribución y Representación de Resultados sobre el Ábaco del DGP.

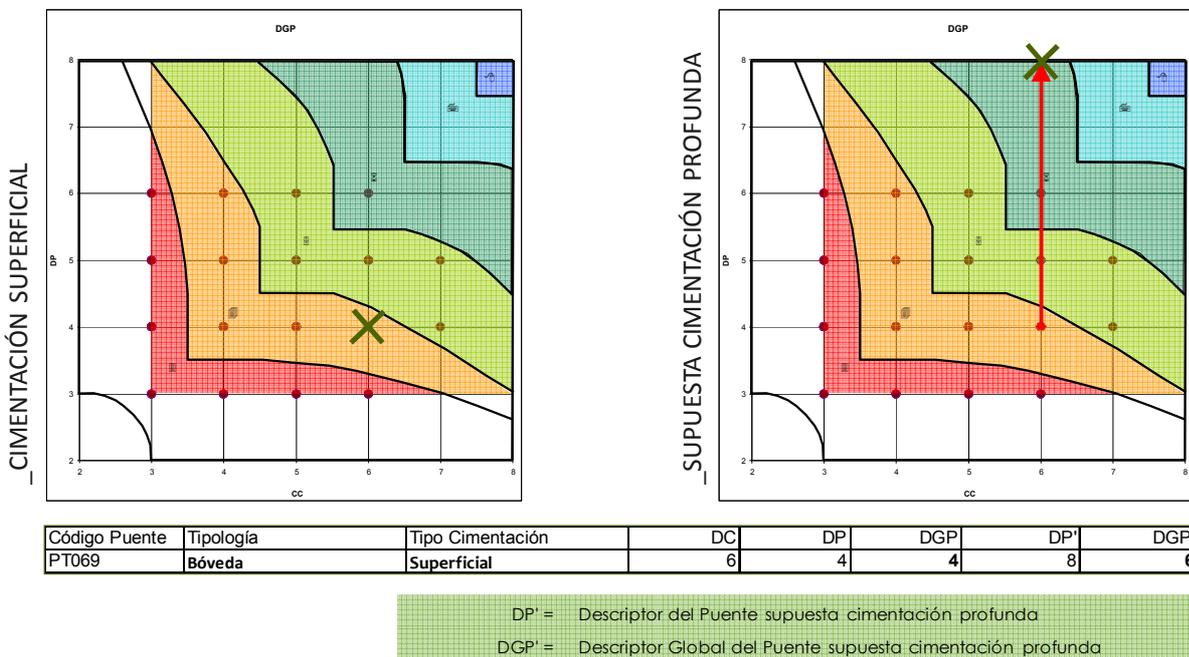


Figura 14 - Influencia de la cimentación en la evaluación de la vulnerabilidad de puentes frente a avenidas.

6. CONCLUSIONES

La metodología propuesta está basada en inspecciones de campo diseñadas al efecto (Inspección Fluvial). En este sentido, es fundamental recordar la importancia que una

debida formación de los inspectores tiene para garantizar que la toma de datos sea fiable y homogénea. Esta formación se traduce en un curso de formación específico realizado antes del comienzo de la campaña de campo y de una o varias jornadas de dudas o seguimiento de resultados. Esta inspección, objetiva, sistemática y completa, está además normalizada (Fichas de Inspección). Es completa por cuanto considera la interacción cauce-puente en avenidas de manera global - erosiones generales, de contracción y locales, incremento de empujes, problemas de capacidad hidráulica, problemas asociados a la capacidad de transporte del flujo en avenidas e incluso al propio tipo de cauce, etc.-. Por todo ello, y para que la calidad de la información recopilada sea suficiente, requiere de un tiempo mínimo de inspección, que se puede estimar en media, de 1 a 1,50 horas para la realidad de los puentes pertenecientes a la RCE en España, dependiente del Ministerio de Fomento.

Se puede afirmar que la metodología propuesta es finalista, pues consigue cuantificar la vulnerabilidad frente a avenidas del conjunto de puentes fluviales inspeccionado, clasificándolos en función de ella, sin perder el significado físico de los parámetros y aspectos que recogiendo los factores principales intervinientes conducen a dicha clasificación, y permitiendo en última instancia, extraer los puentes que se encuentran en peor situación, de manera tal que se priorizan y conducen las actuaciones necesarias en ellos -en cuanto a la orientación en relación al tipo de medidas a tomar en los puentes- optimizando el uso de los recursos disponibles, siempre limitados. Obviamente, la definición última de estas actuaciones debe ser objeto de estudios de detalle.

La metodología permite conocer si la vulnerabilidad se debe a un proceso de socavación (visible) o a fenómenos no apreciables de forma directa (contracción de la anchura del cauce, obstrucción potencial, etc.) que pasarían desapercibidos en una inspección visual convencional y que alertan sobre una situación precaria aplicando la metodología propuesta.

REFERENCIAS

1. Cinotto, Peter J. and White, Kirk E. (2000). Procedures for Scour Assessments at Bridges in Pennsylvania. Open-File Report 00-64. U.S. Geological Survey. U.S. Department of the Interior.
2. Fernández Bono, J.F. y Vallés Morán, F.J. (2001). Análisis de los Procesos de Dinámica Fluvial Provocados por la Avenida de octubre de 2000 en la Rambla Cervera (Castellón) y su Influencia en la Inestabilidad y Colapso de los Puentes que salvan la Rambla en las Carreteras CV-132, CV-10 y CV-135. Grupo de Ingeniería Fluvial. IIAMA. Universidad Politécnica de Valencia. España.
3. Fernández Bono, J.F. (2003). El Caso de los Cauces del Torrent Mal y la Riera Magarola en Esparreguera (Barcelona). Curso de Especialización Ingeniería Fluvial. Fundació Politècnica de Catalunya. Universitat Politècnica de Catalunya. España.
4. Fernández Bono, J.F. y Vallés Morán, F.J. (2004). Cuantificación de la vulnerabilidad de puentes sobre cauces frente a avenidas. Proceso metodológico. Casos reales. Memorias XII Convención Científica Internacional de Ingeniería y Arquitectura. CUJAE. Ministerio de Educación Superior. Cuba.
5. Lagasse, P.F., Schall, J.D., and Richardson E.V. (2001). Stream Stability at Highway Structures. HEC 20. Hydraulic Engineering Circular No. 20; Third Edition. Report No. FHWA NHI 01-002. Federal Highway Administration. U.S. Department of transportation. Washington, D.C.
6. Vallés Morán, F.J. (2002). Interacción Avenida-Cauce-Estructuras I.- Interacción con Obras No Hidráulicas: Puentes. II Jornadas de Ingeniería Fluvial. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Valencia. España.
7. Vallés Morán, F.J. y Fernández Bono, J.F. (2006). Metodología Sistemática para la Cuantificación de la Vulnerabilidad de Puentes sobre Cauces frente a Avenidas. Aplicación a Casos Reales. XXII Congreso Latinoamericano de Hidráulica Ciudad Guayana, Venezuela, IAHR.
8. Vallés Morán, F.J., Arias Hofman, G. y Fernández Bono, J.F. (2009). Manual de Inspección Principal de Cauces. Obtención de datos para la evaluación de la vulnerabilidad de un puente frente a avenidas. Universidad Politécnica de Valencia e INES ingenieros consultores. España.