

# ¿CUÁN A MENUDO HAY QUE INSPECCIONAR EL PATRIMONIO EDIFICADO?

## RESPUESTA A PARTIR DE UN ESTUDIO DE SIMULACIÓN EN DURABILIDAD<sup>1</sup>

Carles Serrat

Dept. de Matemàtica Aplicada I - Escola Politècnica Superior d'Edificació de Barcelona

Universitat Politècnica de Catalunya BarcelonaTECH, España

La toma de decisiones sobre intervención en obra existente se basa, generalmente, en información recogida a partir de inspecciones, como herramienta sistemática fundamental para la identificación no sólo de los bienes sino también de los indicadores del estado de lesión o deterioro que padezcan los edificios. En este sentido, para llevar a cabo una eficiente tarea preventiva y de mantenimiento, es imprescindible el conocimiento de la distribución de la evolución de las lesiones que se consideren y sobre las que se desee intervenir. Esta información, desafortunadamente, no existe y son pocos los estudios que describan el ciclo de vida de los elementos constructivos en obra, por lo que se debe recurrir a estimadores de durabilidad basados en inspecciones.

El principal problema de esta metodología es la gran variabilidad del estimador resultante. En consecuencia, el técnico o investigador se pregunta cuán lejos está la estimación obtenida de la distribución real de los tiempos y cuán precisa es esta estimación para, a partir de ella, llevar a cabo una toma de decisión eficiente respecto de la intervención. Naturalmente, una observación continuada y automática del patrimonio edificado permitiría obtener estimadores más precisos, pero para la mayoría de las lesiones no es posible dicha monitorización y su substitución por un seguimiento continuo basado en inspecciones realizadas por técnicos es inalcanzable por los costos que supone.

El objetivo de este trabajo es presentar la investigación que se está llevando a cabo en el *Institut d'Estadística i Matemàtica Aplicada a l'Edificació* y el *Laboratori d'Edificació* de la UPC (Barcelona-España) sobre el diseño eficiente de planes de inspección sobre patrimonio edificado. La investigación se plantea en forma de simulación y pretende dar respuesta a las cuestiones planteadas en los párrafos anteriores.

---

<sup>1</sup> El autor agradece el soporte recibido por la Escola Politècnica Superior d'Edificació de Barcelona (EPSEB-UPC) y por el Ministerio de Ciencia e Innovación mediante el proyecto MTM2008-06747-C02-01. También agradece a los autores de Proyectos Final de Carrera o Trabajos Final de Master vinculados con esta área de investigación por su contribución y a los miembros del Laboratori d'Edificació y del Institut d'Estadística i Matemàtica Aplicada a l'Edificació (IEMAE) por sus importantes comentarios y sugerencias en las fases preliminares del trabajo.

## Introducción a la metodología y motivación de la investigación

Buerger-Goodwin et al. (2005) propusieron el interés del uso de las funciones de supervivencia para el seguimiento y mantenimiento del parque edificado. Recientemente, Serrat et al. (2009) presentaron una metodología de inspección y de análisis para el caso del estudio del tiempo hasta la lesión en fachada en obra existente. En cuanto a la metodología de inspección, Serrat et al. (2009) propusieron una inspección sistemática de los elementos de las fachadas orientada a la detección de factores de riesgo de las mismas a partir de la caracterización de los edificios, los elementos constructivos que componen las fachadas y sus materiales, las lesiones más recurrentes que pueden afectar a las fachadas, la gravedad de dichas lesiones y, por último, su magnitud. Los datos obtenidos fruto de una inspección se conocen como *current status data* y se caracterizan por ser objeto del efecto de la censura<sup>2</sup> debido a la imposibilidad de observar los tiempos exactos en que el evento de interés (el fallo o lesión en este caso) acontece. En cuanto a la metodología de análisis, la durabilidad fue estimada con un estimador no paramétrico<sup>3</sup> que tiene en cuenta la censura en los datos y aprovecha toda la información disponible, y que extiende el estimador clásico de Kaplan y Meier (1958).

Una consecuencia inmediata de una elevada proporción de censura en los datos genera una elevada variabilidad en los estimadores resultantes y el investigador se puede preguntar, para un momento dado, cuán lejos está el estimador que propone del verdadero valor de durabilidad. Es obvio que una programación de inspecciones sucesivas mejora la calidad de los datos (aunque siguen siendo cien por cien censurados) y reduce el efecto negativo de la censura en la precisión de los estimadores. Y la pregunta es: ¿Cuán a menudo hay que inspeccionar el edificio para una eficiente estimación de la durabilidad? En este sentido, el objetivo de esta investigación es el estudio vía simulación de cuál debe ser una programación eficiente de inspecciones que minimice el efecto de la censura.

## Diseño y ejecución del estudio de simulación

Los escenarios de simulación se plantean a partir de: a) la distribución de probabilidad real de los tiempos de fallo (familia de distribuciones, forma y escala), b) el número de edificios objeto de inspección y c) el mecanismo de inspección aplicado (número de inspecciones realizadas sobre un mismo edificio y su distribución en el tiempo). Esta configuración da lugar a más de cuatro mil quinientos escenarios que permiten estudiar, de forma exhaustiva, modelos bajo hipótesis que incluyen una gran variabilidad de distribuciones de riesgo y de estrategias de inspección. Para cada escenario se calcula la función de durabilidad estimada y se mide su bondad de ajuste lo que permite estudiar la eficiencia de los estimadores resultantes.

### Familia de distribución de probabilidad

En cuanto a las funciones de densidad que cabe considerar hay que tener en cuenta los distintos patrones de comportamiento de la función de riesgo, y en consecuencia de la función de durabilidad. En este sentido se han considerado distribuciones Weibull para la modelización del riesgo monótono (creciente, constante o decreciente con el tiempo), distribuciones Lognormal para el caso de una función de riesgo amortiguado o bien distribuciones que permitan una función de riesgo en forma de bañera (*bathtub*), como son

---

<sup>2</sup> Gómez y Canela, 1994; Meeker y Escobar, 1998; Kleinbaum y Klein, 2010

<sup>3</sup> Turnbull, 1976

una combinación Weibull-Exponencial-Weibull, la familia Gamma-Weibull (o Gamma generalizada) y la familia Weibull con resistencia (*resilience*). Detalles sobre dichas funciones de densidad se pueden encontrar en Marshall y Olkin (2007).

La Tabla 1 muestra la configuración seleccionada de parámetros para cada distribución, siendo 78 el número de escenarios distribucionales objeto de simulación. Esta configuración recorre los distintos patrones de durabilidad en la ventana de observación que se considera de 150 años. Las Figuras 2 a 5 ilustran las funciones de durabilidad y de riesgo obtenidas en cada caso.

Tabla 1: Escenarios distribucionales para la simulación

Familia	Parámetros	Valores	# escenarios
Weibull	$\alpha$ (forma)	$\alpha = 0.5, 1, 1.5, 2, 3, 4$	6
	$\beta$ (escala)	$\beta = 50$	
Lognormal	$\mu$ (localizacion)	$\mu = 1, 2, 3, 3.5, 4, 4.5, 5, 5.5, 6, 6.5$	30
	$\sigma$ (escala)	$\sigma = 0.5, 1, 2$	
<b>Bathtub</b>			
Weibull-exponential-weibull.	$\alpha_1$ (forma Weibull <sub>1</sub> )	$\alpha_1 = 0, 5$	24
	$a$ (1r punto)	$a = 5$	
	$b$ (2o punto)	$b = 10, 25$	
	$\beta$ (escala)	$\beta = 10, 25, 50, 100$	
	$\alpha_2$ (forma Weibull <sub>2</sub> )	$\alpha_2 = 1.5, 2, 3$	
Gamma generalizada	$\alpha$ (forma Weibull)	$\alpha = 1.5, 2, 3$	9
	$\beta$ (escala)	$\beta = 125$	
	$\nu$ (forma Gamma)	$\nu = 0.1, 0.2, 0.3$	
Weibull with resilience	$\alpha$ (forma Weibull)	$\alpha = 1.5, 2, 3$	9
	$\beta$ (escala)	$\beta = 125$	
	$\eta$ (resilience)	$\eta = 0.1, 0.2, 0.3$	
<b>Total</b>			<b>78</b>

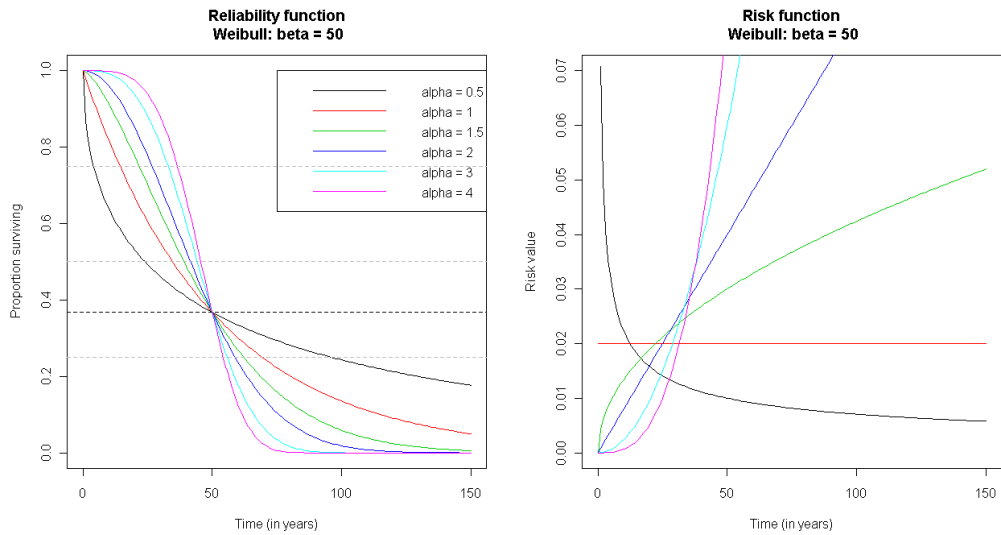


Figura 1: Funciones de durabilidad y de riesgo para distintos parámetros de la distribución Weibull

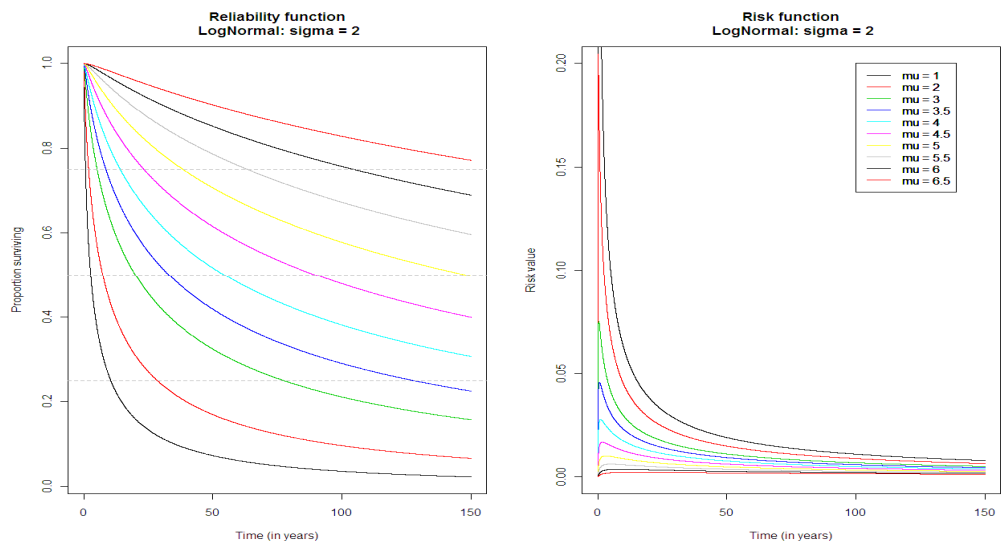


Figura 2: Funciones de durabilidad y de riesgo para distintos parámetros de la distribución LogNormal

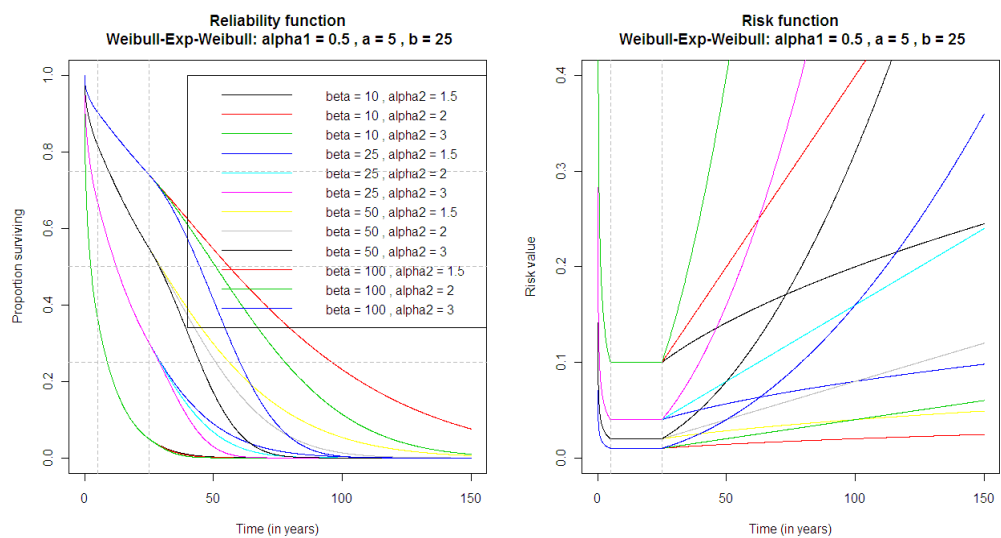


Figura 3: Funciones de durabilidad y de riesgo para distintos parámetros de la distribución Weibull-Exponencial-Weibull

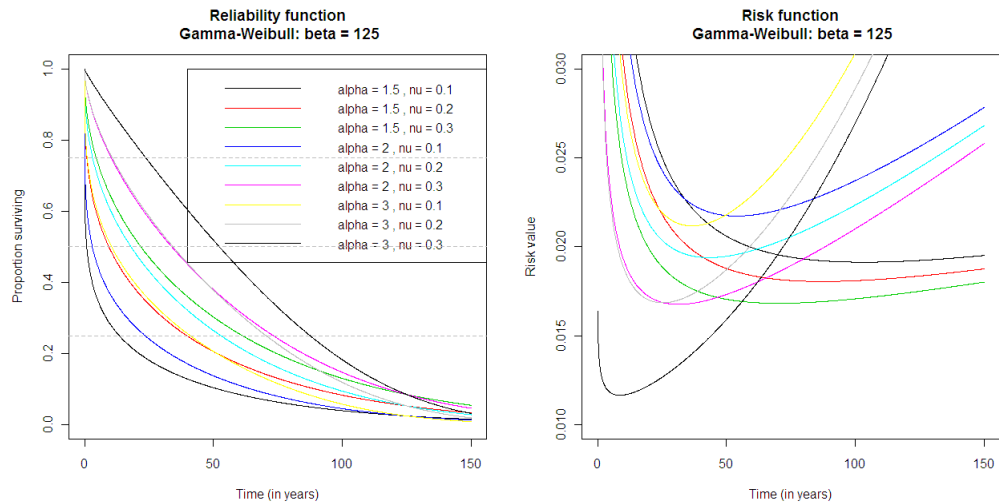


Figura 4: Funciones de durabilidad y de riesgo para distintos parámetros de la distribución Gamma-Weibull

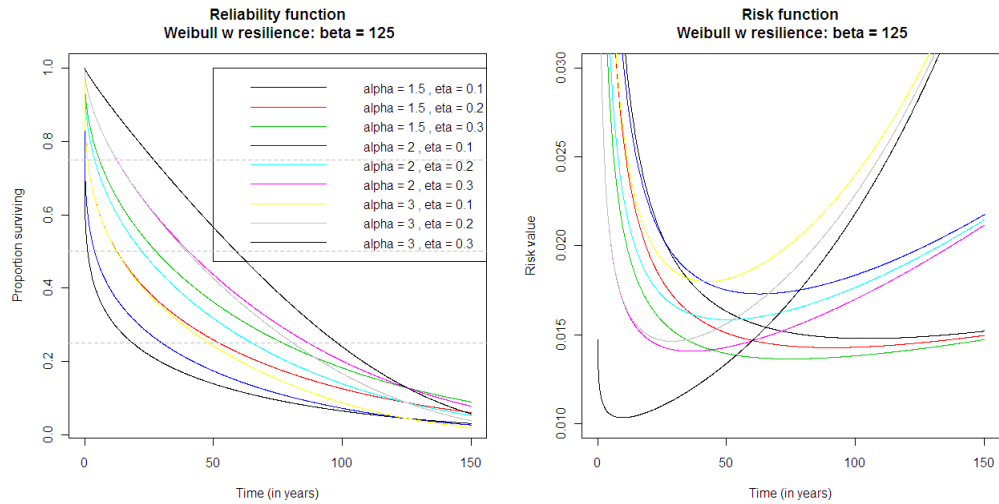


Figura 5: Funciones de durabilidad y de riesgo para distintos parámetros de la distribución Weibull *with resilience*

### Tamaño muestral

En cuanto al número de edificios objeto de inspección se ha considerado los valores  $n=100$ ,  $n=400$ ,  $n=1600$  y  $n=6400$ , con el fin de poder detectar en que medida un tamaño muestral suficientemente grande puede corregir el efecto negativo de la censura en los datos sobre el estimador resultante.

### Programación de inspecciones

En cuanto a la programación de inspecciones, para cada distribución y tamaño muestral que se considere se plantean dos estrategias de inspección, en función del número de inspecciones y el intervalado entre ellas, a saber:

1. De 1 a 5 inspecciones con un intervalo igual a la quinta parte del rango intercuartílico
2. De 1 a 10 inspecciones con un intervalo igual a la décima parte del rango intercuartílico.

En todos los casos el momento de inspección inicial se genera con una distribución uniforme entre el momento 0 y el percentil del 99.9% de la distribución real. Este planteamiento genera 15 mecanismos distintos de inspección para cada conjunto de datos simulado.

### Escenarios resultantes

Con la configuraciones citadas en las secciones previas el número de escenarios a simular es de  $78 \cdot 4 \cdot 15 = 4680$ .

### Número de réplicas de simulación y medida de bondad del ajuste

Para cada uno de los 4680 escenarios de simulación se ejecutan y evalúan 1000 réplicas de simulación. La evaluación de la bondad de ajuste de cada una de las réplicas se mide de forma puntual en los percentiles reales (conocidos a priori en el momento de escoger la distribución) del 10%, 25%, 50% y 75% y de forma global a partir del porcentaje resultante de censura por la izquierda, por la derecha y en un intervalo y el supremo de los residuos en la ventana de observación. Más concretamente, en cada cuantil se mide: el sesgo, la cobertura del intervalo de confianza al 95% y la semiamplitud del intervalo de confianza. Los estadísticos resumen de las réplicas de un escenario son:

1. En cada cuantil, el sesgo medio, el *mean square error* (varianza + sesgo<sup>2</sup>), la cobertura media y la semiamplitud media.
2. Con carácter global, las medias de los porcentajes de censura observados, el máximo de los supremos y la media y desviación típica de la distribución de puntos en los que los supremos se alcanzan.

### Esquema de simulación

La Figura 6 ilustra el diagrama de flujo de generación de las réplicas de simulación y los datos y resultados asociados.

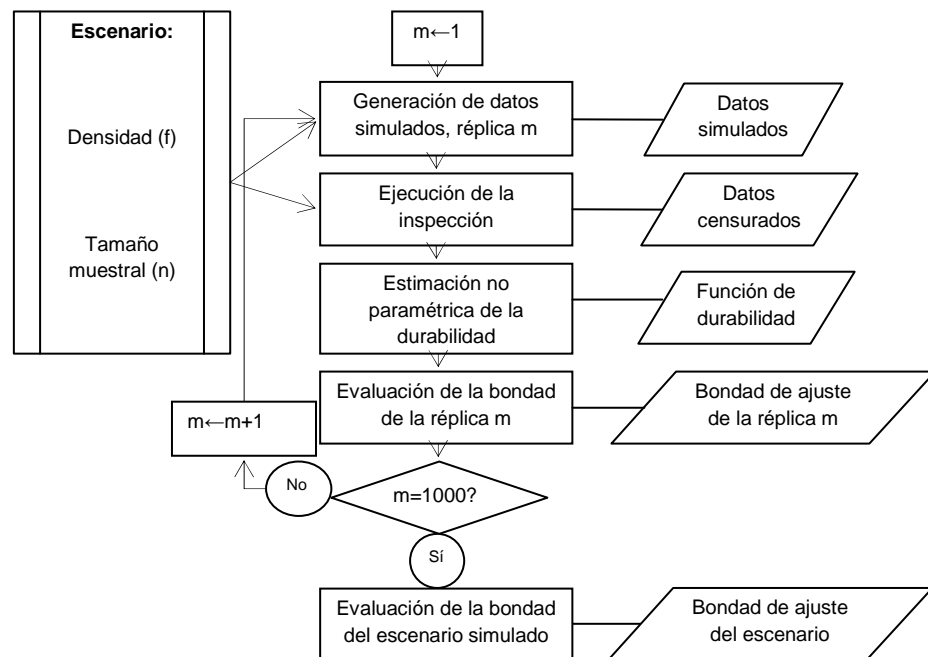


Figura 6: Diagrama de flujo de la ejecución de la simulación

## Implementación y análisis de resultados

Todas las funciones necesarias para la simulación han sido desarrolladas en S-PLUS®, de Insightful® (Braun y Murdoch, 2008).

La interpretación de resultados se deriva de la comparativa de los estadísticos resumen obtenidos al final de la ejecución de la simulación para cada uno de los escenarios. De manera puntual, en función del interés del investigador, serán recomendables aquellos mecanismos de inspección que tiendan a una...

- Reducción del sesgo medio,
- Reducción del *mean square error*,
- Cobertura media próxima (o superior) a la nominal (95%),
- Reducción de la semiamplitud del intervalo de confianza.

A su vez, de manera global, el máximo de los supremos de los residuos (y la distribución de la localización de los mismos) representa una cota superior de los errores máximos a obtener y permite de forma global validar la bondad del ajuste obtenido. Por otra parte, para un mismo escenario distribucional diferentes tamaños muestrales y estrategias de inspección se pueden comparar vía el cociente de los MSE, lo que permite determinar cuál y en qué medida es más eficiente.

## Discusión y trabajos futuros

Se ha presentado una herramienta útil para el diseño de programas de inspección en patrimonio edificado con el fin de obtener estimadores eficientes de durabilidad. La propuesta permite al investigador o técnico, a partir de los requerimientos de resultados de carácter puntual o global y la información distribucional aproximada, diseñar la estrategia de inspección más eficiente. Una ventaja importante de esta metodología es su independencia del tipo de lesión o evento de interés que se considere, aunque claramente sí dependa de la distribución subyacente en los datos.

Con el fin de servir de soporte a la toma de decisiones, una posible extensión de esta metodología podría ser el incorporar en la estrategia de inspección el coste asociado, con el fin de valorar el precio de la mejora en la calidad de la información obtenida a partir de sucesivas inspecciones.

## **BIBLIOGRAFÍA**

- BRAUN WJ. y MURDOCH DJ. (2008), *A First Course in Statistical Programming with R*. Cambridge University Press.
- BUERGEL-GOODWIN E., FERRARA C. y BRADLEY PE. (2005), Survival functions of buildings and building elements. In *Proceedings of the 10DBMC International Conference On Durability of Building Materials and Elements*. Lyon, France.
- GÓMEZ G. y CANELA MA. (1994), *Fiabilitat industrial*. Edicions UPC, Barcelona, Spain.
- KAPLAN EL. y MEIER P. (1958), Nonparametric estimation from incomplete observations. *Journal of the American Statistical Association*, **53**, 457-481.
- KLEINBAUM DG y KLEIN M. (2010), *Survival Analysis: A Self-Learning Text*. Springer New York.
- MARSHALL AW. y OLKIN, I. (2007), *Life distributions*. Springer Series in Statistics. Springer Science+Business Media, LLC, New York, USA.

MEEKER W. y ESCOBAR L. (1998), *Statistical Methods for Reliability Data*. John Wiley & Sons, New York, USA

SERRAT C., GIBERT, V. y JORDANA, F. (2009), Survival analysis techniques applied to building maintenance. *In Proceedings of the 1st International Conference in Building Research*, EUATM-UPM (Eds), Madrid.

TURNBULL BW. (1976), The empirical distribution function with arbitrarily grouped, censored and truncated data. *Journal of the Royal Statistical Society, Series B*, **38** (3), 290-295.