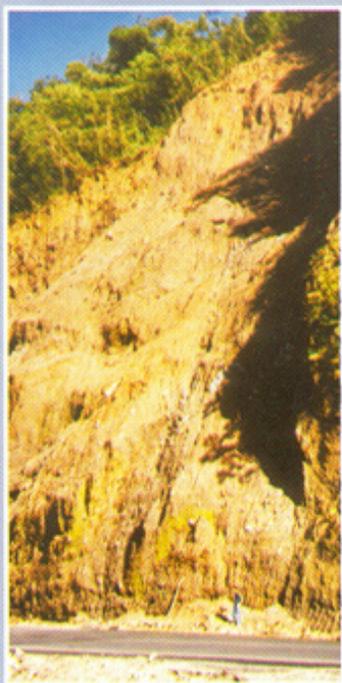


Introducción a la estimación de costos referidos a daños naturales y costos de obras de mitigación por medio del uso de técnicas de simulación

Masciarelli Edgardo Alberto*
Arranz, Pablo**
Zeballos, Marcelo Esteban***



INTRODUCCIÓN

La forma de tratar los peligros naturales a la hora de realizar evaluaciones de proyectos es a través de la valoración de los costos involucrados (costos de obras de mitigación, costos de reparación de daños, costos indirectos sobre la sociedad, etc.). Estos costos son independientes de variables aleatorias y, como tales, poseen características probabilísticas y de riesgo asociadas. El concepto enunciado se puede completar diciendo que la forma de tratar los Peligros Naturales en la Evaluación de Proyectos es por medio de la valoración probabilística de los costos resultantes del desencadenamiento de un desastre natural, de las inversiones en obras de mitigación y bajo la consideración del riesgo involucrado. La metodología a aplicar y comentarios al respecto ya han sido tratados por los autores con anterioridad (Masciarelli et al; 1997a, 1997b, 1997c, 1997d, 2000a, 2000b, 2000c, 2000d y Arranz et al; 2000).

En este marco, los "Costos Totales" constituyen una variable aleatoria definida como la suma de costos de inversión y costos de daños. Si bien las consideraciones teóricas permitirían deducir la función de densidad de probabilidades de las variables originales, las dificultades teóricas (existencia de una relación diferenciable entre las variables independientes y la dependiente), la multiplicidad de variables intervinientes, etc., hacen que esto no resulte una solución sencilla en la práctica. Como medio alternativo se utilizan modelos numéricos de muestreo y simulación (técnica de Montecarlo).

En este documento se comenta la aplicación de estas técnicas de simulación a un caso sencillo de valoración de costos de obras de mitigación. El análisis se realiza en forma cooperativa a través del programa Crystal Ball (Desicionering Inc, 2000) y por medio de una modelación manual a través del

empleo de una hoja de cálculo. Actualmente el programa mencionado es utilizado en el estudio de riesgo en diversos proyectos y recomendado por organismos internacionales de financiamiento para la evaluación de inversiones en sistemas viales.

CARACTERÍSTICAS DEL EJEMPLO CONSIDERADO

Las características principales de la aplicación considerada comprenden una obra de mitigación frente a peligros hidráulicos en un sistema vial. Estas obras se definen, por ejemplo, como obras para encauzar y evacuar aguas de escurrimientos pluviales, sistemas de drenaje sub-superficial, etc. El objetivo de este documento es caracterizar el costo total de la obra en el marco de los conceptos de vulnerabilidad planteados.

Las erogaciones por inversiones incluyen aquellas correspondientes a la materialización de las obras, los requerimientos de mantenimiento y operación a lo largo de su vida útil, valoradas en términos de precios sociales o de cuenta, y descontadas al momento presente (Valor Presente, VP, o Valor Actual, VA).

Los daños no evitados comprenden aquellos costos que se producen cuando las condiciones de diseño de las obras de mitigación propuestas son superadas en su capacidad de atenuación por un fenómeno natural determinado. Se consideró que existen dos tipos de daños:

- Aquellos originados por roturas y puesta fuera de servicio de infraestructura o componentes del sistema vial, y
- Aquellos adicionales que resultan del funcionamiento inadecuado del sistema vial (por cortes, desvíos, demoras, etc.) y otros costos causados a la sociedad en forma indirecta.

Los primeros implican la reconstrucción y puesta

en servicio, al menos de las obras de mitigación que se hayan visto superadas y la reparación de otros componentes afectados. La otra categoría de daños considerados en el caso tratado incluye, por ejemplo, costos por anegamientos de campos, afectación de las actividades productivas, afectación de actividades de distribución y comercialización de productos, mayores recorridos por desvíos, etc., y en general, costos adicionales de todas aquellas actividades que se ven afectadas por cortes de ruta, cambios en los usos productivos en el área de influencia del sistema vial, cambios en las condiciones de desarrollo, a corto y mediano plazo, impactos reversibles e irreversibles, etc.

Cada uno de los componentes considerados en el costo total deben ser caracterizados como variable aleatoria. Esto es, por medio de medidas descriptivas de los valores y su variabilidad, y por densidades de probabilidad.

Dentro del conjunto de elementos de caracterización del problema debe considerarse la existencia de una variable aleatoria adicional, denominada "ocurrencia del fenómeno", que adopta valores categóricos en función de la severidad del fenómeno natural. Los aspectos básicos de la cuantificación aplicada se presentan a continuación.

Ocurrencia del Fenómeno (Ro)

Según se mencionó, esta es una variable aleatoria categórica que adopta valores de acuerdo a los siguientes eventos disjuntos:

A_1 = ocurren escurrimientos correspondientes a lluvias superiores a una de período de recurrencia igual a 25 años. ($R_o = 3$)

A_2 = ocurren escurrimientos correspondientes a lluvias superiores a una de período de recurrencia igual a 10 años y menores a una de período de recurrencia de 25 años. ($R_o = 2$)

A_3 = ocurren escurrimientos correspondientes a lluvias superiores a una de período de recurrencia igual a 5 años y menores a una de período de recurrencia de 5 años. $R_o = 1$

A_4 = no ocurren escurrimientos de importancia o escurrimientos correspondientes a lluvias menores a la de período de recurrencia de 5 años. $R_o = 0$

Las probabilidades asignadas a cada evento se pueden calcular sobre la base de los períodos de recurrencia y considerando que los eventos definidos anteriormente resultan disjuntos y

exhaustivos (ver apéndice). Siguiendo este razonamiento los valores establecidos finalmente son:

$$f(0) = P(R_o=0) = 0,80$$

$$f(1) = P(R_o=1) = 0,10$$

$$f(2) = P(R_o=2) = 0,06$$

$$f(3) = P(R_o=3) = 0,04$$

$$f(x) = P(R_o=x) = 0,00$$

Inversiones (Xi)

Con el fin de simplificar el tratamiento del problema se adoptó una densidad de probabilidades normal con parámetros $\mu = 180.000$ (media,

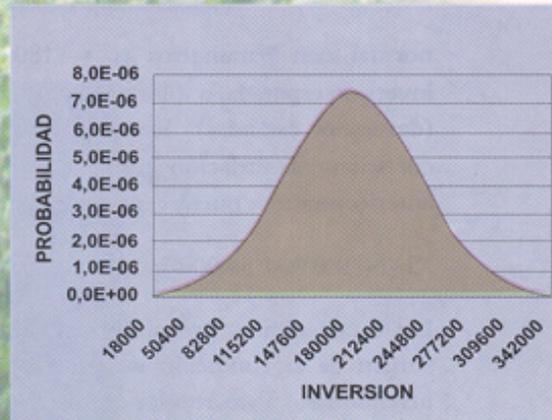


Figura 1: Función Densidad de Probabilidad Versus Inversiones.

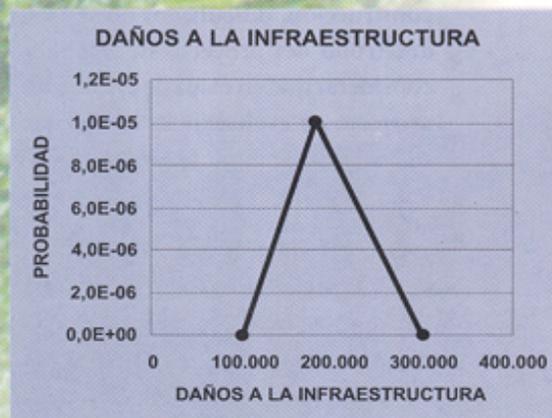


Figura 2: Función Densidad de Probabilidad Versus Daños a la Infraestructura.

Parámetro	Valor
Valor Extremo Mínimo	\$100.000
Valor Modal	\$180.000
Valor Extremo Máximo	\$300.000

Tabla 1: Parámetros de Densidad de Probabilidades de Daños a la Infraestructura. Variable Xdi

Nivel de Severidad de Evento	Valor Extremo Mínimo	Valor Modal	Valor Extremo Máximo
X_{da_0} (si $X_o=0$)	\$0	\$0	\$0
X_{da_1} (si $X_o=1$)	\$100.000	\$150.000	\$200.000
X_{da_2} (si $X_o=2$)	\$200.000	\$350.000	\$750.000
X_{da_3} (si $X_o=3$)	\$500.000	\$900.000	\$1.700.000

Tabla 2: Parámetros de Densidad de Probabilidades de Daños Adicionales e Indirectos. Variables X_{da_0} , X_{da_1} , X_{da_2} y X_{da_3} .

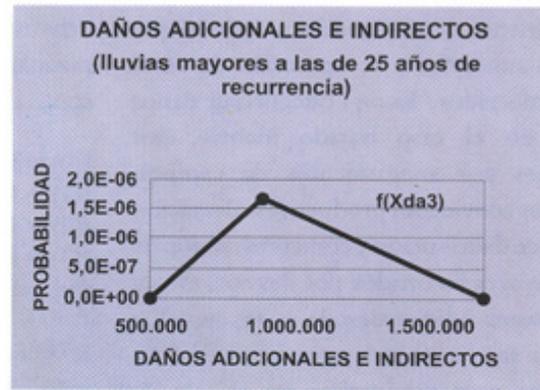


Figura 3: Función Densidad de Probabilidad Versus Daños Adicionales e Indirectos. Lluvias de período de recurrencia mayor a 25 años.

normal con parámetros $\mu = 180.000$ (media, inversión esperada, o valor promedio) y $\sigma = 54.000$ (desviación estándar). Esto se corresponde con un coeficiente de variación (μ/σ) de 0.30. Lo indicado anteriormente se puede expresar como:

$$X_i \sim N(180.000; 54.000^2)$$

Las características probabilísticas de esta variable surgen de la condición de "presupuesto" de las inversiones. Esto resulta en que el valor que se obtendría finalmente como costo es distinto del presupuesto. La variabilidad es inherente en la construcción de obras de infraestructura en función del seguimiento que se haga de la misma calidad de construcción, dificultades no apreciadas durante el desarrollo del proyecto de ingeniería, etc. Cabe considerar que en etapa de estudio de factibilidad de proyecto en evaluaciones es aconsejable establecer las variables intervinientes con precisión menor o igual $\pm 20\%$.

Daños a la infraestructura y a los componentes de la red vial (X_{di})

Se supuso que esta clase de daños resultaban dependientes de la magnitud de obra construida (o en otras palabras de la inversión necesaria) y de la severidad del fenómeno producido (sólo se producirían daños en caso de ocurrir un desastre de magnitudes superiores a aquel para el que fue diseñada la obra). Se consideró que esta variable X_{di} , tenía una densidad de probabilidad triangular con los parámetros indicados en la Tabla N° 1.

Daños adicionales e indirectos (X_{da_1} , X_{da_2} , X_{da_3})

La magnitud de los daños adicionales e indirectos se consideró dependiente de la severidad del evento natural producido y del diseño de la obra de u vez

mitigación (en otras palabras: sólo se producirían daños en caso de que los parámetros utilizados para el diseño de la obra de mitigación fueran superados). A su vez para cada evento de una severidad dada, los daños resultantes se consideraron variables aleatorias con densidad de probabilidad triangular. En la tabla N° 2 se indican los parámetros considerados en las diferentes variables X_{da_0} , X_{da_1} , X_{da_2} , y X_{da_3} .

SIMULACIÓN

Con los datos indicados se confeccionó un modelo sobre la base de la siguiente expresión de suma de costos:

$$CT = X_i + I_{R_o=1,2,3} X_{di} + I_{R_o=1} X_{da_1} + I_{R_o=2} X_{da_2} + I_{R_o=3} X_{da_3}$$

Donde:

$X_i, X_{di}, X_{da_1}, X_{da_2}, X_{da_3}$: Son las variables de costos de inversión, daños a la infraestructura y otros daños según se indicó anteriormente.

$I_{R_o=1,2,3}$: Variable indicadora que adopta valor 1 si R_o es 1, 2 ó 3 y 0 en cualquier otro valor de R_o .

$I_{R_o=1}$: Variable indicadora que adopta valor 1 si R_o es 1 y 0 en cualquier otro valor de R_o

$I_{R_o=2}$: Variable indicadora que adopta valor 1 si R_o es 2 y 0 en cualquier otro valor de R_o

$I_{R_o=3}$: Variable indicadora que adopta valor 1 si R_o es 3 y 0 en cualquier otro valor de R_o

Este módulo sencillo se elaboró en planillas de cálculo en dos versiones: la primera de ellas, apta para la ejecución manual de la simulación y la

segunda versión para la aplicación del programa Crystall Ball.

En la aplicación del programa mencionado, la carga de datos resulta sencilla y sólo se encontraron ligeros inconvenientes en el momento de codificar la variable "Daños adicionales", por intervenir en conjunción con variables indicadoras y ser éstas, a su vez, funciones de otras variables aleatorias.

Con ambas versiones del modelo se realizaron 5.000 simulaciones. El resumen de los resultados de la aplicación del software comercial se muestra en la Tabla N° 3.

Como se observa (Figura N° 4), resulta una densidad de probabilidad bimodal: la moda de menor valor corresponde a las condiciones de no ocurrencia de eventos naturales (esta situación se produce en un 80% de las veces) y la moda de mayor valor se corresponde con la ocurrencia de algún evento natural que supere las condiciones de diseño de las obras (con una probabilidad conjunta de todos los eventos del 20%).

Los percentiles obtenidos se presentan en la Tabla N° 4. Como se observa existe una marcada asimetría (observada también a partir del coeficiente de asimetría mencionado entre los valores anteriores). Esta característica se pone de manifiesto al considerar que el valor que resulta superado en el 90% de los casos es 119.000, aquel que es superado en el 50% de los casos es de 197.000 y el que sólo es superado en el 10% de las veces es

Corridas	5.000
Media	302.003,25
Mediana	196.716,63
Moda	---
Desviación Estándar	302.612,22
Varianza	9,157E+10
Asimetría	2,85
Curtosis	11,74
Mínimo de Rango	10.463,68
Máximo de Rango	2.036.713,12
Ancho de Rango	2.026.249,44

Percentil	Valor
0%	10.463,68
10%	119.123,70
20%	144.569,98
30%	161.746,36
40%	179.139,24
50%	196.716,63
60%	217.103,65
70%	240.962,57
80%	322.894,82
90%	624.270,70
100%	2.036.716,12

624.000. La diferencia entre el primero y el segundo es marcadamente inferior a la diferencia entre el segundo y el tercero. Otra manera de observar estos resultados es que el valor medio de la inversión (\$180.000) es superado en el 60% de las veces (percentil 40%).

COMENTARIOS Y CONSIDERACIONES FINALES

En este documento se ha realizado la simulación comparativa entre el programa Crystall Ball y un modelo desarrollado en planillas de cálculo para la simulación manual, sobre la base de un ejemplo sencillo de uso en el caso de obras de mitigación frente a peligros naturales. El ejemplo supone el diseño de obras para mitigar los efectos del escurrimiento de aguas de precipitación en una red vial y la caracterización de los costos como variables aleatorias para su inclusión en procesos de evaluación de proyectos.

Tabla 3: Resultados de Simulación.



Tabla 4: Percentiles resultantes de simulación.



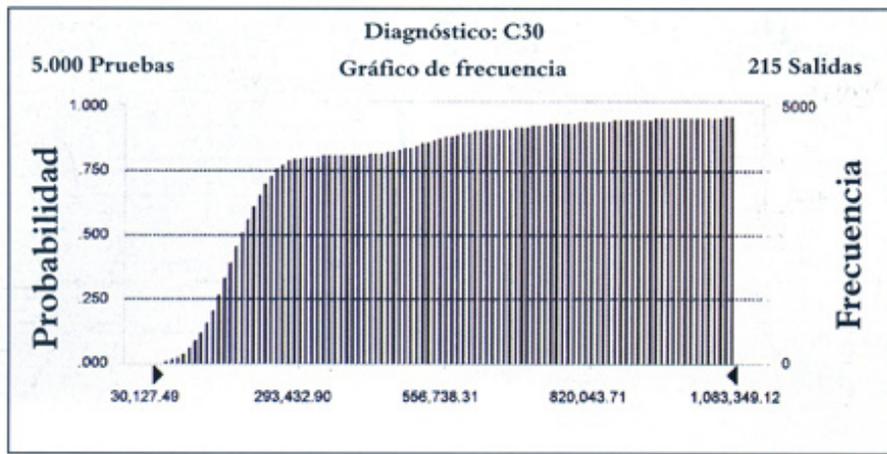


Figura 5: Histograma de Frecuencias. Costo total

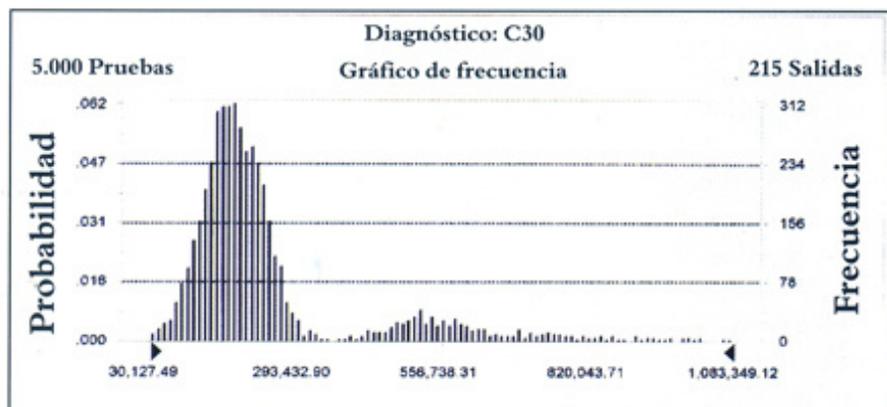


Figura 6: Histograma de Frecuencias Acumuladas. Costo total

La técnica de simulación planteada se ha verificado a través de la coincidencia de los resultados. El uso de Crystall Ball posee características de interés, como ser el ahorro de tiempo respecto a la modelación manual y la facilidad de manejo cuando el modelo resulta más complejo. Como inconveniente del módulo utilizado, se puede mencionar que las densidades de probabilidad no pueden especificarse a través de valores en celdas de la planilla de cálculo, sino que resultan de valores codificados en forma fija en formularios y campos desarrollados ad hoc. De esta manera resulta engorroso realizar cambios en la codificación de las características probabilísticas de las variables intervinientes y observar las variaciones producidas al considerar traslaciones o cambios de escala. En otras palabras resulta difícil responder a preguntas tales como ¿cuáles serían los resultados si los daños se reducen en \$100.000? ó ¿cuáles son los resultados si las inversiones resultan un 10% mayores?. Para obtener respuestas a estos cuestionamientos de evaluación de sensibilidad de variables debe realizarse la recodificación completa de los parámetros de las densidades de probabilidad utilizadas.

Por otro lado, cabe destacar que, para cualquiera de las dos versiones del modelo, resulta crucial el análisis de los datos a considerar y su específica caracterización como variables aleatorias. Debe destacarse el estudio tanto de los valores descriptivos (valores medios, modales, variabilidad y rango de variación, etc.) Como de las funciones de



densidad de probabilidades. Ambos aspectos revisten dificultades propias. Los valores descriptivos centrales y de variación están caracterizados por ser valores "futuros" o "presupuestos", con los inconvenientes que esto implica a la hora de realizar estimaciones. Adicionalmente, intervienen distintos componentes de variabilidad en el problema. A grandes rasgos, algunos componentes resultan en variabilidad acotada porque surgen de la propia acción del hombre. Entre estos se puede mencionar, a modo de ejemplo, las inversiones. Existen discrepancias entre los valores presupuestos y los reales futuros por imprevisiones durante la construcción, diferencias de calidad, imprevistos, etc. Sobre estos aspectos el hombre siempre trata de acotar la variabilidad con mayor o menor éxito. Algunos otros componentes de la variabilidad general del problema responden a resultados de fenómenos naturales los cuales la dispersión de valores se manifiesta en plenitud. Como ejemplo, se puede mencionar la valoración de daños originados por una supuesta inundación: la misma variabilidad del fenómeno hace que la dispersión de valores de daños originados sea grande.

Complementariamente a lo expresado hasta aquí, la definición de las densidades de probabilidad asociadas poseen dificultades aún mayores. Las determinaciones pueden estar basadas en concepciones técnicas (como por ejemplo, por el uso de frecuencias relativas o de períodos de recurrencia), como subjetivas (el caso de análisis de decisiones bayesiano). Como sea, el peligro de que el usuario adopte distribuciones alejadas de la realidad o simplistas se encuentra siempre latente. Como corolario se puede decir que, aún en poder de una herramienta más que adecuada para el problema a tratar (en este caso el programa Crystall Ball o las técnicas de simulación en general) resulta ilusorio creer que su uso redunde en beneficios si no se han considerado y analizado minuciosamente los datos de simulación. En este sentido, estas herramientas deben complementarse con técnicas vinculadas al análisis de decisión y análisis de riesgo con el fin de establecer las densidades de probabilidad adecuadas y llegar a resultados verosímiles.

Finalmente, resta decir que en este documento introductorio sólo se trataron aspectos sencillos del uso del programa Crystall Ball y de las técnicas de simulación en general. Se pueden realizar análisis

complementarios, de mayor complejidad y con la finalidad de realizar una más compleja evaluación de proyectos. Así, se pueden considerar, por ejemplo, la comparación de las inversiones frente a los beneficios obtenidos de las obras como tales (inversiones frente a daños evitados) y realizar una valoración acerca de la variabilidad de las obras de mitigación, la comparación entre dos o más obras de mitigación diferentes o diseñadas para distintas condiciones de solicitud por medio de la verificación de indicadores económicos de las diferencias de los flujos de caja de una y otra, (esto respondería a, por ejemplo, ¿es más rentable en términos sociales construir una obra que resiste lluvias de 10 o 25 años de período de recurrencia?), la decisión, similar a la anterior pero sobre un conjunto de más de dos obras de mitigación, la priorización de diferentes proyectos de mitigación (el problema de optimización de decisiones que además se encuentra incluido como un módulo de software analizado), etc. Las diferentes alternativas de análisis implican diferencias en el tratamiento conceptual del problema, de los datos y en el uso de diferentes técnicas de simulación y módulos de resolución de la herramienta informática empleada.

BIBLIOGRAFIA

Arranz, P.; Masciarelli, E. A.; Tartabini, M. I. (2000) Economic Aspects Of Roads Vulnerability To Natural Hazards. 5th International Symposium On Environmental Geotechnology And Global Sustainable Development Belo Horizonte, Minas Gerais, Brazil.

Benjamin, J. R.; Cornell, C. A. (1981) Probabilidad y Estadística en Ingeniería Civil, Ed. Mc.Graw Hill.

Decisioneering Inc., Crystall Ball, (2000) Documentación electrónica de demostración de funcionamiento del programa Crystall Ball.

Decisioneering Inc. Crystall Ball (2000) Documentación Electrónica Manual de Ayuda del programa Crystall Ball.

Hoel, P.; Prot, S.; Stone, C., (1971) Introduction of Probability Theory. Ed: Houghton Mifflin Company.

Masciarelli, E. A.; Marhuenda, F.; Zeballos, M.; Arranz, P. (1997a) Evaluación de Proyectos considerando la Vulnerabilidad a los Peligros Naturales. II PROVIAL NACIONAL, San Juan, Argentina.

Masciarelli, E. A.; Arranz, P.; Marhuenda, F.; Zeballos, M.; Abril, E. (1997b) La Consideración de la Vulnerabilidad a los Peligros Naturales en la Evaluación de Proyectos Viales. VIII Congreso Chileno de Ingeniería del Transporte. Santiago, Chile.

Masciarelli, E. A.; Giacchino, M.; Ponce, P. (2000c) Evaluación de un Proyecto de Carreteras con Inclusión de Conceptos Sobre Vulnerabilidad. VI Congreso de Vialidad y Tránsito, Mérida, Venezuela.

Masciarelli, E. A.; Giacchino, M.; Ponce, P. (2000d) Project appraisal including concepts of vulnerability to natural hazards. XI Congreso Panamericano De Tránsito Y Transporte. Gramados, Brasil.

Organización de Estados Americanos. (1993) Departamento de Desarrollo Regional y Medio Ambiente. Manual sobre el Manejo de Peligros Naturales en la Planificación para el Desarrollo Regional Integrado. Washington, D.C.

Thompson, P. And John Perry (Editores) (1992) Engineering Construction Risks Ed: Thomas Telford, London.

APÉNDICE

Cálculo de probabilidades. Ocurrencia de un fenómeno natural.

Ante la ocurrencia de un desastre natural y el problema de determinar las probabilidades asociadas, se pueden considerar los eventos disjuntos definidos sobre un espacio de probabilidad según las siguientes descripciones:

A_1 = ocurren escurrimientos correspondientes a lluvias superiores a una de período de recurrencia igual a 25 años. $R_0 = 3$

A_2 = ocurren escurrimientos correspondientes a lluvias superiores a una de período de recurrencia igual a 10 años y menores a una de período de recurrencia de 25 años. $R_0 = 2$

A_3 = ocurren escurrimientos correspondientes a lluvias superiores a una de período de recurrencia igual a 5 años y menores a una de período de recurrencia de 10 años. $R_0 = 1$

A_4 = no ocurren escurrimientos de importancia o escurrimientos correspondientes a lluvias menores

A los fines del cálculo, las probabilidades asociadas a cada uno de los eventos (y consecuentemente a cada uno de los valores de la variable aleatoria R_0) se determinan de la siguiente manera:

Considérese el evento A_i y su complementario.

A_i^c = ocurren escurrimientos correspondientes a lluvias superiores a una de período de recurrencia igual a 5 años.

$$P(A_i^c) = 1/T = 1/5 = 0.20$$

Siendo T el período de recurrencia:

$$P(A_i) = 1 - P(A_i^c) = 1 - 0.20 = 0.80$$

La probabilidad de que la variable aleatoria R_0 , "ocurrencia del fenómeno" tome un valor es de 0.80.

Para el caso de la categoría 1 ($R_0 = 1$) cabe considerar que el evento A_i^c definido anteriormente se puede expresar como la unión de eventos disjuntos.

$$A_i^c = A_1 \cup B; A_i \cap B = \emptyset$$

Donde T es el período de recurrencia. Así

$$P(A_i) = 0.20 - 0.10$$

De igual manera se puede operar con los restantes eventos y se llega finalmente a la expresión de la función densidad de probabilidades siguiente:

$$f(0) = P(R_0 = 0) = 0.80$$

$$f(1) = P(R_0 = 1) = 0.10$$

$$f(2) = P(R_0 = 2) = 0.06$$

$$f(3) = P(R_0 = 3) = 0.04$$

$$f(x) = P(R_0 = x) = 0.00$$

Si x es distinto de 0, 1, 2 ó 3



* **Universidad Nacional de Córdoba, Argentina**
E-mail: emasciar@com.uncor.edu

** **Universidad Nacional de Córdoba, Argentina**
E-mail: parranz@com.uncor.edu

*** **Universidad Nacional de Córdoba, Argentina**
E-mail: mzeballo@com.uncor.edu