

4 ANÁLISIS ESTADÍSTICO. SIMULACIONES

M. M. Astiz; A. García y R. Ortiz (2)

La aproximación estadística es a veces la única herramienta que tenemos para describir un fenómeno, a ella acudimos cuando sólo disponemos de datos experimentales y no de un modelo determinista, por ello algunos la definen como *la formalización de la ignorancia*. La estadística nunca nos va a poder contestar las preguntas básicas de la gestión de desastres: *el donde, cuando y como*. Sin embargo, dado el escaso conocimiento que tenemos del comportamiento de la mayoría de los volcanes, muchas veces sólo "jugamos con ellos a los dados" y la única manera que tenemos de estimar lo que vamos a perder en la partida es haciendo estadística (Araña y Ortiz, 1993). No olvidemos tampoco que en la sociedad actual la estructura económica se basa en invertir, ganar o perder y todo ello en un tiempo lo más breve posible. Por ello, el saber lo que nos va a costar el volcán en los próximos años tiene cada vez más interés y a ello se dedican intensivamente las grandes compañías de seguros. En este capítulo tratamos algunos aspectos de esta aproximación al análisis del riesgo volcánico. Una introducción amplia sobre estadística puede encontrarse en Rios, 1977.

Durante siglos se estudiaron científicamente fenómenos que daban origen a situaciones deterministas o causales en que las condiciones o causas determinan perfectamente los resultados o efectos. Para el estudio científico de los fenómenos deterministas se hace preciso el registro y constatación de ciertas permanencias. En el caso de fenómenos aleatorios estas permanencias o regularidades aparecen al considerar un gran número de pruebas. La noción de probabilidad como valor límite ideal de estas regularidades es la base del modelo apropiado para el estudio de éstos fenómenos. Por tanto, el cálculo de probabilidades, puede definirse como el modelo matemático de las regularidades que se observan en las series de frecuencias correspondientes a fenómenos aleatorios. Uno de los objetivos del cálculo de probabilidades es determinar distribuciones que puedan servir de modelos a los variadísimos fenómenos aleatorios que se presentan en las ciencias experimentales. El estudio de un volcán puede considerarse un fenómeno de este tipo si se trata de predecir cuando va a entrar en erupción o se trata de evaluar la zona en la que se va a producir un determinado daño. Dicho estudio se puede iniciar suponiendo que el comportamiento estadístico de un volcán sigue una distribución binomial. Sea un experimento aleatorio S y consideremos en relación con él un suceso A (éxito) y el contrario nA (fracaso). Supongamos que

$$P(A) = p, \quad P(nA) = q = 1 - p$$

Si se hace un cierto número n de pruebas sucesivas, independientes y en las mismas condiciones, se define un espacio de probabilidad en el que se puede definir la variable aleatoria binomial:

$$\xi = \text{Número de éxitos en el suceso considerado}$$

Un suceso con r éxitos y $n - r$ fracasos tiene como probabilidad:

$$p^r q^{n-r}$$

Ahora bien, las ordenaciones posibles de las n posibilidades son las permutaciones n -arias con repetición de ambas, luego la probabilidad buscada será:

$$P(\xi=r) = \frac{n!}{r!(n-r)!} p^r q^{n-r}$$

Esta es la llamada distribución binomial o de las pruebas repetidas, cuyo nombre proviene de que estas probabilidades son los términos del desarrollo binómico:

$$(p+q)^n = \sum_{r=0}^n \binom{n}{r} p^r q^{n-r}$$

La función de distribución será:

$$F(x) = \sum_{r=x}^n \binom{n}{r} p^r q^{n-r}$$

Sin embargo, es frecuente que se presenten en la práctica situaciones en que se aplica la distribución binomial con p muy pequeño y n (número de pruebas o extensión de la muestra) grande. Entonces la probabilidad se obtiene con el paso al límite cuando n tiende a infinito, de la distribución binomial. Así, se obtiene la distribución de Poisson, que también es susceptible de representar con buena aproximación el fenómeno real considerado. Llamando $\lambda = np$, tenemos entonces que la probabilidad es

$$P(\xi=r) = \frac{\lambda^r}{r!} e^{-\lambda}$$

Esta distribución se aplica frecuentemente cuando se trata de un fenómeno de probabilidad muy pequeña en cada observación y tratamos de obtener probabilidades P_k de que ocurra un suceso un número k de veces en un conjunto de un número grande de observaciones. Si consideramos una sucesión en el tiempo de sucesos aleatorios que tienen lugar en instantes iguales de tiempo, tenemos que considerar la ley de probabilidad de una variable aleatoria que da el número de sucesos al variar t . La probabilidad $P_k(t)$ de k sucesos en el intervalo de tiempo t viene dada por

$$P_k(t) = e^{-\lambda t} \frac{\lambda^k t^k}{k!}$$

Esta es la llamada ley de Poisson de parámetro t .

Supongamos que un experimento físico se repite un número N de veces y que cada vez contamos el número de sucesos en un intervalo de longitud t . Sea N_k el número de veces en que se han observado k sucesos

$$N = N_0 + N_1 + \dots + N_k + \dots$$

El número total de sucesos en los N experimentos es

$$N_1 + 2N_2 + 3N_3 + \dots = T$$

y T/N es el promedio. Si N es grande

$$N_k \sim NP_k$$

y por tanto

$$T \sim N\lambda t$$

de donde

$$\lambda \sim \frac{T}{Nt}$$

Esto permite obtener, aproximadamente, λ de las observaciones, es decir, estimar y calcular luego las probabilidades con este λ y comparar con los posteriores experimentos.

4.1. HISTORIA ERUPTIVA

El saber cuando será la próxima erupción es la primera pregunta que se nos hace cuando se nos pregunta por un volcán. Sin embargo, aunque a corto plazo las técnicas de seguimiento nos permitan conocer si el volcán está en un periodo tranquilo o no, a largo plazo sólo podemos utilizar una aproximación estadística, basada en el conocimiento de sus erupciones históricas, y en muchos casos sólo a partir de los datos aportados por las técnicas geocronológicas¹. Sin embargo, el error que presentan los datos geocronológicos hace que estos sean difícilmente compatibles con las dataciones históricas de las erupciones. Pero son muy pocos los volcanes en los que podamos disponer de un catálogo de erupciones históricas

¹ Un análisis más completo del comportamiento estadístico de los volcanes se puede encontrar en Riesgo Volcánico de Araña y Ortiz recogido en el libro Nuevas Tendencias en Volcanología editado por el CSIC en 1993. También en Elementos de Volcanología, editado por la Casa de los Volcanes del Cabildo de Lanzarote (Diez Gil 1992) se recogen varios artículos que tratan el tema.

que superen los pocos miles de años. En general, nos encontraremos con sólo unos pocos centenares de años de historia.

La mayoría de los volcanes entran en erupción de forma irregular. El intervalo de tiempo transcurrido entre dos erupciones se conoce como tiempo de reposo y análogamente el tiempo de erupción corresponde a la duración de la misma. Cuando se trabaja con volcanes que presentan erupciones frecuentes, seguramente dispondremos de más de una docena de ellas perfectamente datadas. En tal caso, podemos aplicar el siguiente método para tratar de reconstruir la historia eruptiva del volcán: se construye una tabla con las fechas de las erupciones y se calcula el tiempo de reposo (ejemplo tomado de Kovach, 1995, datos en De la Cruz-Reyna y Sanchez, 1994):

HISTORIA ERUPTIVA DEL POPOCATÉPETL	
Año erupción	Tiempo de reposo
1519	-
1530	11
1539	9
1542	3
1548	6
1571	23
1592	21
1642	50
1664-67	22-25
1697	30-33
1720	23
1802-04	82-84
1920	118-116
1995	75

Seguidamente podemos construir una segunda tabla, calculando el número de veces que el volcán ha permanecido más de un determinado tiempo sin entrar en erupción. Esta distribución en muchos volcanes responde a una forma del tipo (distribución de Poisson):

$$\log(N) = \alpha - \beta t$$

Esta expresión es equivalente a la ley de Gutenberg-Richter que nos da la distribución de las magnitudes de los sismos que se producen en una determinada región. Debemos recordar que este tipo de distribuciones parte de la hipótesis de que el fenómeno no tiene memoria, es decir es independiente del tiempo. La ocurrencia de una erupción es independiente de cuando ocurrió la anterior y está idénticamente distribuida.

HISTORIA ERUPTIVA DEL POPOCATÉPETL	
N	ΔT
13	3
12	6
10	9
9	11
8	21
7	22
6	23
5	30
4	50
3	75
2	82
1	118

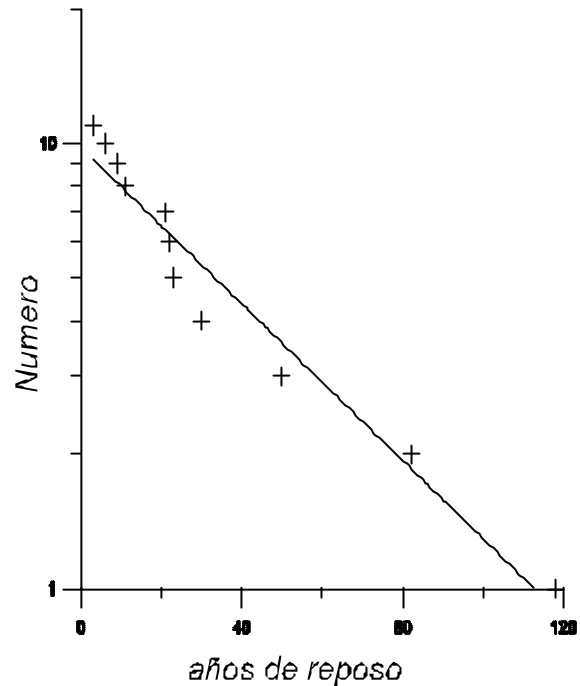


Figura 4-1 Número de veces que el periodo de reposo ha superado un tiempo dado

En el ejemplo que estamos considerando obtenemos un valor para β de 0.0202 años^{-1} . Si un volcán responde bien a una distribución de este tipo, podemos utilizar la expresión de la distribución de Poisson para obtener la probabilidad de que ocurran n erupciones en un intervalo de tiempo Δt :

$$P(n) = \frac{(\beta \Delta t)^n}{n!} \exp(-\beta \Delta t)$$

con el valor de β podemos calcular cuales son las probabilidades de que en veinte años no ocurra erupción $P(0)$, una $P(1)$ o dos erupciones $P(2)$:

$$P(0) = 0.66 \quad P(1) = 0.27 \quad P(2) = 0.05$$

Valores pequeños para β corresponden a probabilidades muy altas de que no ocurra ninguna erupción en un inmediato futuro. La probabilidad de que no ocurra una erupción en el intervalo de tiempo Δt viene dada por:

$$\exp(-\beta \Delta t)$$

y la probabilidad de que ocurra es:

$$1 - \exp(-\beta \Delta t)$$

Lamentablemente, la mayor parte de los volcanes y especialmente los más peligrosos entran en erupción muy pocas veces, por lo que no es posible conocer exactamente los años en que ocurrieron un número suficiente de erupciones para que el valor β obtenido sea significativo. Además, los volcanes son sistemas deterministas, que presentan sus ciclos eruptivos, condicionados por los procesos de alimentación y de evolución magmática. Como ejemplo vamos a repetir el mismo análisis pero ahora con el Colima, volcán caracterizado por emplazarse en su cráter y cuya evolución origina diversas fases explosivas (datos en De la Cruz-Reyna y Sanchez 1994)

HISTORIA ERUPTIVA DEL COLIMA	
Año erupción	Tiempo de reposo
1560	-
1576	16
1585	9
1590	5
1606	16
1622	16
1690	68
1771	81
1795	24
1806	11
1818	12
1869	51
1872	3
1886	14
1889	3

1890	1
1893	3
1903	10
1908	5
1909	1
1913	4
1991	78

HISTORIA ERUPTIVA DEL COLIMA	
N	Δt
1	21
3	19
4	16
5	15
9	13
10	12
11	11
12	10
14	9
16	8
24	5
51	4
68	3
78	2
81	1

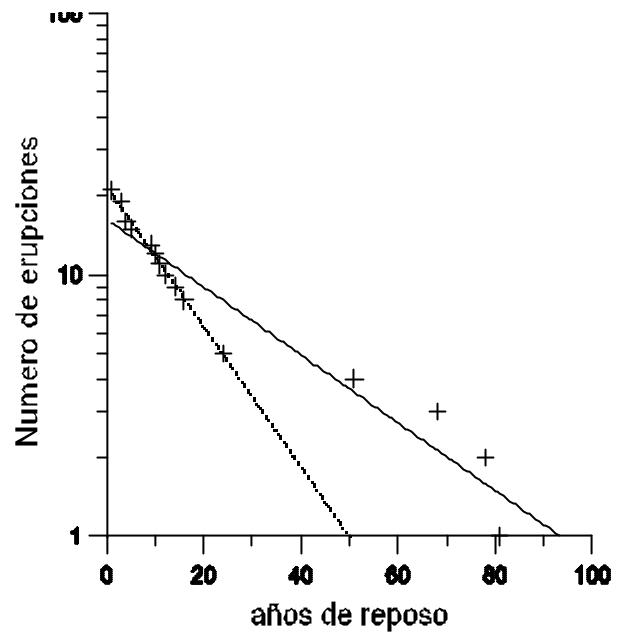


Figura 4-2 El análisis gráfico de la distribución de los intervalos de reposo del volcán Colima muestra dos ajustes distintos según se consideren todos los datos o sólo los intervalos de reposo menores de 20 años. Este comportamiento es muy frecuente en muchos volcanes, dificultando, cuando no imposibilitando, el tratamiento estadístico de la actividad volcánica.

Considerando como válidos dos ajustes, uno que incluya todos los intervalos de reposo disponibles (de 1 a 81 años) y otro sólo los menores de 20 años, obtenemos valores de β de 0.0298 y 0.0628. Las probabilidades de tener una erupción en 20 años varían entre 0.45 y 0.71 según sea el valor de β elegido.

El período de retorno, que se define como el período medio entre eventos idénticos, se determina fácilmente a partir del número de erupciones de un mismo tipo y el tiempo transcurrido:

$$Pr = \frac{m}{n}$$

donde m es el número de muestras y n el número de observaciones, en nuestro caso m el número de erupciones de un determinado tipo y n los años transcurridos. Pero en general m y n no son lo bastante grandes para que la muestra pueda considerarse estadísticamente representativa. Para el ejemplo del Popocatépetl obtendríamos:

$Pr = 30$ años

Si admitimos que el sistema responde a una distribución de Poisson, podemos conocer entre que límites puede estar comprendido el periodo de retorno para un intervalo de confianza λ dado mediante la expresión (Tiedemann, 1992):

$$\frac{1}{n+\lambda} \left(m + \frac{\lambda}{2} - \left(m \left(1 - \frac{m}{n} \right) + \frac{\lambda^2}{4} \right)^{\frac{1}{2}} \right) \leq \frac{1}{P} \leq \frac{1}{n+\lambda} \left(m + \frac{\lambda}{2} + \left(m \left(1 - \frac{m}{n} \right) + \frac{\lambda^2}{4} \right)^{\frac{1}{2}} \right)$$

donde λ es la integral de Gauss para el valor de confianza deseado y que usualmente se toma de una tabla (Abranowitz y Stegun, 1965):

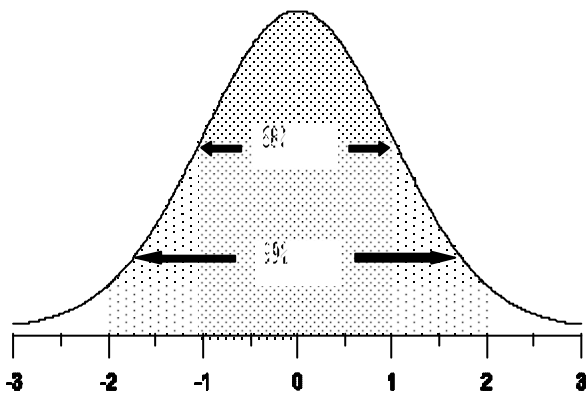


Figura 4-3 Integral de Gauss

TABLA III	
Margen de confianza	λ
80%	1.282
90%	1.645
95%	1.960
97.5%	2.2415
99%	2.5757
99.5%	2.8075
99.9%	3.29054
99.95%	3.48077
99.99%	3.89059

El cálculo directo del período de retorno en el ejemplo nos da 30 años, ahora bien si calculamos P para $m = 14$, $n = 1950 - 1519$ y una confianza del 95% para la cual $\lambda = 1.960$, obtenemos que $1/P$ varía entre 0.023 y 0.039, que corresponde a períodos comprendidos entre 25 y 43 años, si tomamos el extremo más desfavorable reduce el periodo de retorno en 1.68 veces el obtenido directamente. Si queremos asegurar una confianza del 99% tendremos que $\lambda = 2.5757$, obteniendo una horquilla entre 42 y 25 años.

Supongamos un volcán explosivo del cual sólo sabemos que ha producido una violenta erupción hace 2000 años, para una confianza del 99% obtenemos un período de retorno mínimo de 235 años y de sólo 118 años si queremos asegurar el 99.9%. Los valores superiores corresponderían a períodos de retorno de 17000 y 34000 años respectivamente.

Para un volcán del que no se conoce ninguna erupción en 10000 años obtendríamos valores de 1500 años para un 99% y de sólo 660 años para 99.99%. El valor mayor que no está definido (infinito) corresponde al caso de que el volcán no vuelva a entrar en erupción.

El mismo procedimiento se puede utilizar para estimar las probabilidades de que se desencadenen en el volcán determinados fenómenos. Como ejemplo se muestran las distribuciones correspondiente al tiempo transcurrido desde el momento en que se inicia la erupción hasta que se produce el primer flujo piroclástico y el tiempo transcurrido desde que en un volcán en erupción se produce un incremento apreciable de la actividad observable hasta que se desencadena un flujo piroclástico. Estas distribuciones se han obtenido estudiando 43 erupciones con emisión de flujos piroclásticos (Tomblin y Michael, 1978). En ambos casos el mejor ajuste consigue con distribuciones de la forma:

$$\log(N) = -bt - a$$

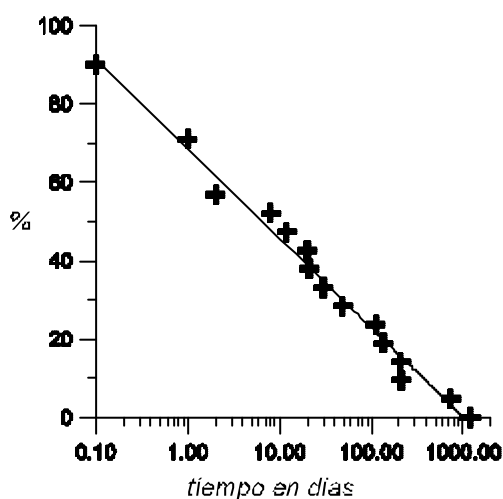


Figura 4-4 Distribución del número de erupciones cuyo tiempo transcurrido entre el inicio de la erupción y el desencadenamiento del primer flujo piroclástico ha superado cada intervalo temporal.

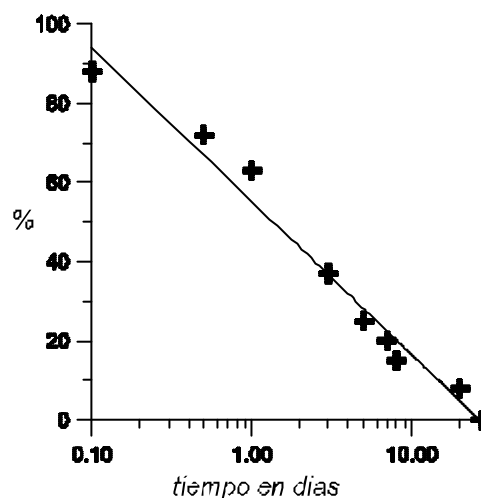


Figura 4-5 Distribución correspondiente al número de erupciones cuyo tiempo transcurrido entre el incremento apreciable de la actividad y la emisión de un flujo piroclástico ha superado cada intervalo temporal.

Ambas distribuciones muestran como más del 70% de los flujos piroclásticos aparecen después de 24 horas de iniciarse la erupción y van precedidos en el 90% de los casos de un incremento notable de la actividad observable en el volcán superior a las 2 horas. También pueden construirse las distribuciones correspondientes a la distancia recorrida por el flujo

piroclástico en función del tiempo transcurrido desde el inicio de la erupción. Sin embargo, el conjunto de datos existente no permite generalizar estos análisis. Hay que tener en cuenta que estos datos corresponden en su mayoría a erupciones observadas históricamente en las Antillas. En cada volcán deberán estudiarse las correspondientes distribuciones, en función de los datos disponibles (generalmente escasos), tratando de completarlos con información de otros volcanes que exhiban un comportamiento similar, siendo siempre de utilidad muy relativa utilizar directamente distribuciones establecidas para otros volcanes.

El análisis estadístico también puede poner de manifiesto pautas de comportamiento estacional en determinados volcanes, cuya razón debemos buscarla en la influencia que determinados parámetros externos, como las mareas o la temporada de lluvias, ejerce sobre la actividad volcánica. La figura 4-6 muestra el reparto mensual de la actividad de volcán Villarrica basada en el estudio de 61 erupciones (Petit-Breuilh, 1994).

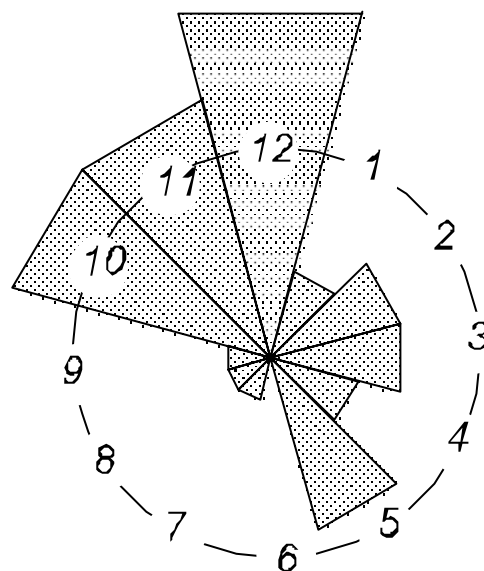


Figura 4-6 Actividad mensual del volcán Villarrica. La actividad aumenta en los meses finales del año que corresponden a la llegada del verano austral (21% de erupciones en Diciembre, 16% en Octubre y Noviembre)

4.1.1. Un ejemplo de evaluación del riesgo

Un simple ejercicio permite hacerse con una idea realista de lo que supone el riesgo volcánico: consideraremos una plantación situada a 10 km de un volcán del que se tienen noticias que ha producido una erupción explosiva hace 2000 años, que arrasó toda la zona. La cosecha se pierde si sobre ella se depositan más de 10 cm de cenizas de proyección aérea. En

el ejemplo no se consideran otros tipos de deposición, ni efectos térmicos o de contaminación ni la influencia que pueda presentar el grado de desarrollo de las plantas en el espesor de la capa de cenizas necesaria para su destrucción.

Deberemos en primer lugar estimar el período de retorno para un evento que produzca a 10 km de la fuente un depósito de más de 10 cm. La primera información de la que disponemos es que el volcán ha presentado actividad explosiva hace 2000 años, lo que permite estimar un período de retorno para una erupción similar comprendido entre 235 y 17.000 años. Ya que estamos en una evaluación del riesgo elegimos el valor extremo de 235 años. En realidad se debería determinar que tipo de erupciones podría provocar un depósito de 10 cm de ceniza en la plantación y evaluar para cada una de ellas el período de retorno. Una evaluación de la prima que deberíamos pagar para asegurar la cosecha se puede hacer de forma elemental de acuerdo con Tiedemann, 1992:

$$X_v = \frac{1000 L f u_v f_0 P}{V R_v}$$

donde X_v es la prima del seguro en ‰; L son las pérdidas esperadas para la erupción considerada en el cálculo del período de retorno y se expresa en ‰ del valor de la suma asegurada V (que se toma siempre 100 para dar X_v en ‰); f factor de corrección debido la destrucción provocada por fenómenos asociados (tsunamis, incendios, etc); u_v es un factor debido la incertidumbre en la evaluación de los periodos de retorno y la magnitud de la erupción, en él suelen incluirse otros factores como los vientos dominantes y se suele adoptar un valor comprendido entre 2 y 3; f_0 es un factor que engloba las comisiones de la compañía de seguros (gastos generales); P es el período de exposición y R_v es el período de retorno en años.

En nuestro caso podemos suponer que una erupción como la ocurrida hace 2000 años nos provocaría unas pérdidas del 50% (L), que podrían agravarse en un factor de 1.5 (f) a causa de la falta de agua para el riego después de la erupción; para el factor de incertidumbre elegimos 2.7 (u_v); el factor que representa los gastos y comisiones se valora en 2.2 (f_0), el período de exposición es de 1 año (P) y el período de retorno de 235 años.

$$X_v = \frac{1000 \cdot 50 \cdot 1.5 \cdot 2.7 \cdot 2.2 \cdot 1}{100 \cdot 235} = 18.9‰/\infty$$

¡El riesgo supone casi el 2% del valor de la cosecha! Como podemos fácilmente observar, la correcta estimación del período de retorno es la clave en la evaluación final de la prima, pues todos los otros factores o son constantes o presentan muy pequeña variación.

4.1.2. Sistemas complejos

En muchos caso no es posible conocer como va a responder el volcán en un futuro inmediato. Sin embargo, si es posible estimar los costos que nos produciría una erupción en las circunstancias actuales y además podremos conocer cual seria el resultado económico de establecer unas determinadas medidas encaminadas a la mitigación del riesgo. Para mostrar la metodología de análisis vamos a considerar un caso sencillo: supongamos un complejo hotelero en una isla en la que existe un volcán activo, debemos saber si es rentable invertir en mantenimiento y desarrollo o no. Consideraremos dos supuestos: en nE no se produce erupción y en E si. En caso de erupción se puede producir la pérdida total del complejo Dt o sólo parcial Dp (por ejemplo 1/5).

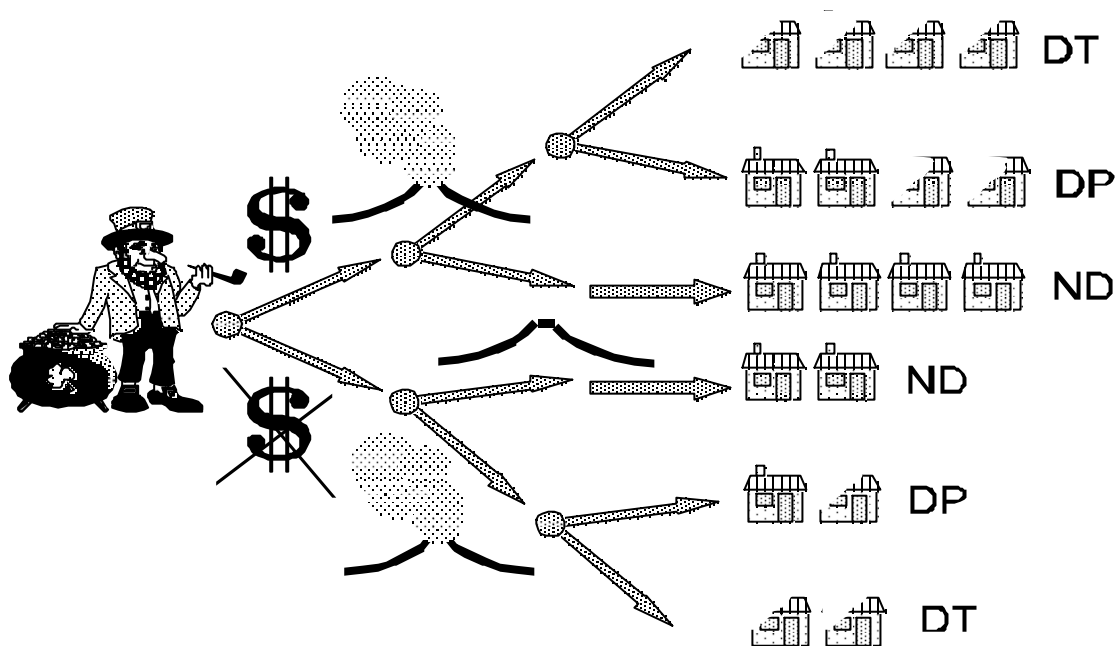


Figura 4-4 Modelo de análisis del riesgo volcánico

Sea V el valor del complejo (terreno e inversiones) e I el coste del mantenimiento y desarrollo. Debemos estimar el resultado económico en base a las probabilidades de que ocurra la erupción y de que su efecto sea la destrucción total o parcial del complejo. Para el caso de continuar las inversiones tenemos:

$$E(In) = P(nE) 0 + P(E) \left\{ P(Dt) [- (V+I)] + P(Dp) \left[- \frac{1}{5} (V+I) \right] \right\}$$

Para el caso en el que se decide suspender todas las inversiones:

$$E(I_n) = P(nE) (-I) + P(E) \left\{ P(D_t) [-V] + P(D_p) \left[-\frac{1}{5}V\right] \right\}$$

Para simplificar los cálculos admitamos que la probabilidad de la destrucción total es igual a la probabilidad de la destrucción parcial (0.5), que la inversión inicial es de 5000 y las inversiones previstas son 2500. La tabla siguiente recoge los resultados obtenidos para varias probabilidades de erupción:

EVALUACIÓN DEL RIESGO VOLCÁNICO			
erupción	no erupción	no inversión	inversión
0.9	0.1	-2950	-4050
0.8	0.2	-2900	-3600
0.7	0.3	-2850	-3150
0.6	0.4	-2850	-2700
0.5	0.5	-2750	-2250
0.1	0.9	-2550	-450

Sólo cuando exista una gran probabilidad de que el volcán va a entrar en erupción se deben limitar las inversiones. Obsérvese que en el ejemplo, incluso con una probabilidad de 0.5 ya es más rentable invertir que no hacerlo. Evidentemente en los supuestos reales el modelo probabilístico se complica considerablemente, pues son muchas las posibilidades de actuación que se nos pueden presentar, pero la metodología de análisis sigue siendo la misma (ver 3.3).

4.2. SIMULACION DE UNA CRISIS VOLCÁNICA

La simulación de una crisis volcánica, por realista que esta se pretenda, exige necesariamente plantear una serie de temas que deberán desarrollarse sobre un computador. Es imposible realizar la evacuación de miles de personas o que los equipos científicos puedan trabajar con datos reales correspondientes al volcán que hoy está en el más absoluto reposo. Por ello, la técnica propuesta consiste en simular mediante computadores los fenómenos que ocurren en el volcán, planteando una serie de cuestiones a los responsables de la Protección Civil y a los científicos del comité de crisis volcánicas. Las medidas que estos toman son introducidas en el computador para poder simular el resultado de las mismas (Fig. 4-5). La construcción de estos simuladores requiere un importante trabajo de programación y codificación, junto con la participación de múltiples especialistas. Sin embargo, es la única aproximación válida para

el entrenamiento del personal que deba actuar en caso de crisis. Este tema se ha introducido en este capítulo debido a que cualquier simulador debe tener una componente aleatoria importante: desde la elección del momento de inicio de la crisis hasta la sucesión de eventos que se producen en el volcán. Igualmente muchas de las actuaciones requerirán la utilización de métodos aleatorios (Montecarlo) para resolverlos.

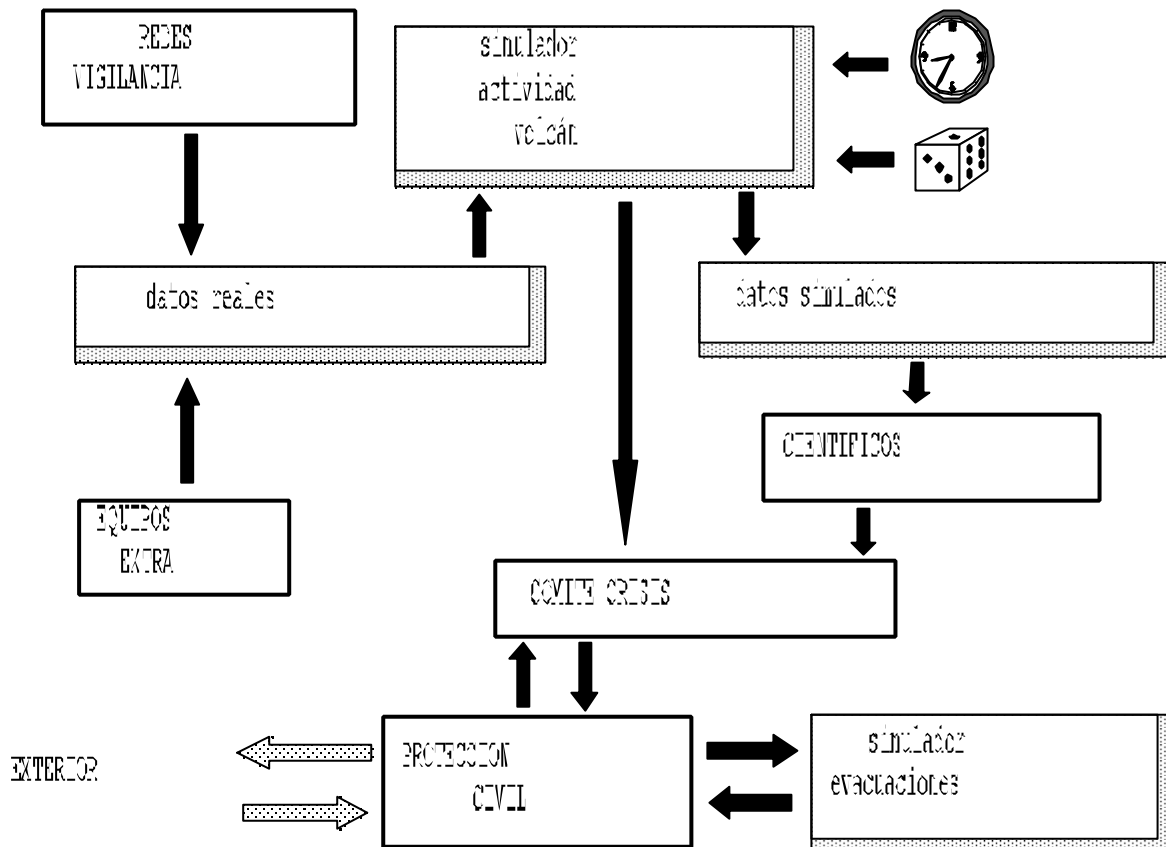


Figura 4-5 Diagrama bloque de una simulación de crisis volcánica: Un computador realiza la simulación de la actividad del volcán en base a un reloj de tiempo real y una componente aleatoria. Los datos reales se mezclan con datos simulados y los científicos deben interpretarlos. Los resultados se comunican al comité y éste adopta las medidas oportunas, muchas de las cuales deben también simularse.

Es importante que en la simulación se trabaje con datos lo más parecidos posible a los datos reales. Para ello se suele proceder de la siguiente forma: se parte de los datos que en tiempo real se están produciendo en la zona como el ruido sísmico, las medidas de deformación obtenidas por los geodestas, el análisis real de gases, etc. A estos datos se les superpone (adecuadamente) los datos simulados (sismogramas sintéticos, análisis anómalos, deformaciones esperadas). De este modo se pone de manifiesto la capacidad del equipo científico

para tratar adecuadamente un elevado número de datos, la capacidad de las redes instrumentales fijas y temporales para discriminar la señal del ruido, el tiempo necesario para obtener una adecuada respuesta y la fiabilidad de la misma. Dada la componente aleatoria del simulador nadie, ni siquiera los especialistas que han desarrollado el sistema pueden saber cual es en cada momento la situación del sistema. Como ejemplo presentamos la simulación de una evacuación, probablemente la parte más conflictiva de cualquier ejercicio de Protección Civil.

4.2.1. Simulación de evacuaciones

En el apartado de simuladores de una emergencia volcánica ocupan un lugar destacado los que hacen referencia al problema de la evacuación. En este capítulo presentamos un simulador muy sencillo, pero que permite representar de modo bastante realista muchos de los problemas que se presentan en la planificación de una evacuación. No hay que insistir en que el objetivo de estos simuladores es servir de entrenamiento para los responsables y técnicos que deben actuar en caso de una crisis y no para resolver los problemas reales que en la crisis se planteen, no tanto porque el modelo no pueda responder adecuadamente, sino porque los datos y parámetros que en él intervienen no están actualizados adecuadamente o simplemente son datos inventados.

El algoritmo que se presenta es de muy sencilla realización, lo que le permite operar correctamente en cualquier ordenador personal. Se trata de un programa realizado en lenguaje C++ producido en el Departamento de Volcanología del CSIC, basado en una idea original que se utilizó en Japón para la gestión de emergencias provocadas por terremotos en ciudades de tipo medio (250.000 habitantes). En Sung Kyun Kim (1981) podemos encontrar su aplicación para la optimización de la evacuación de la ciudad de Shimizu, situada en la costa oeste de la bahía de Suruga, donde se esperaba un importante terremoto que podría dar origen a un tsunami destructor. El modelo permitió establecer los puntos de concentración de la población para su evacuación, el emplazamiento de los puntos de auxilio y los refugios.

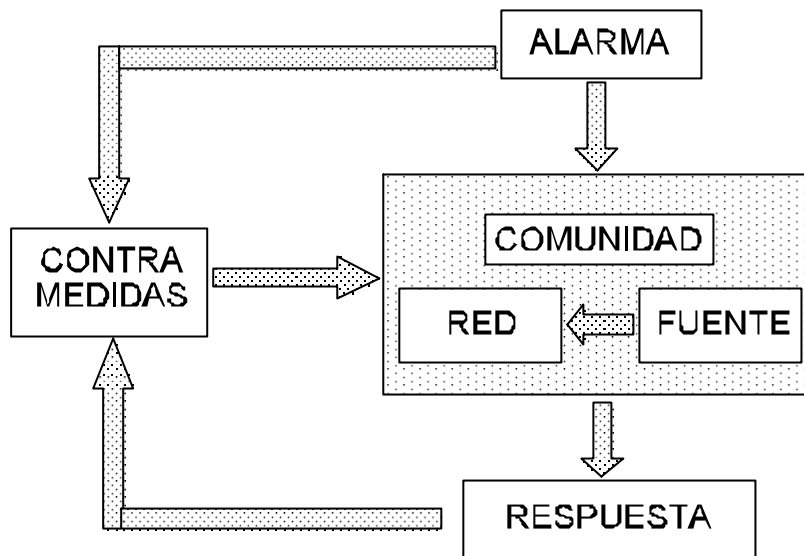


Figura 4-6 Implantación del modelo de evacuación en el simulacro de una emergencia

El simulador (fig. 4.6) considera la comunidad formada por una red de comunicaciones y una serie de fuentes de personas, las cuales tras una alarma se incorporan más o menos pronto a la red viaria para ser evacuadas. El modelo permite simular este proceso y ensayar el efecto de distintas contramedidas. Los resultados de la simulación ponen en evidencia la aparición de puntos de colapso en el proceso de la evacuación y los tiempos necesarios para llevarla a cabo. En caso de evacuaciones a gran escala permite escalonar las alarmas de forma que se obtengan tiempos menores y analizar las posibles vías alternativas.

El modelo de la evacuación se ha realizado adoptando una estructura de autómatas celulares (Freeman y Skapura, 1993). Para simplificar la programación se ha utilizado un algoritmo que considera todas las células idénticas, de modo semejante al utilizado para la modelización de coladas lávicas (Crisci et al., 1993). Cada celda está definida por un conjunto mínimo de parámetros, que representan la capacidad de transporte de la celda y el número de personas residentes en la misma (Fig 4-7). Este modo de proceder permite automatizar la generación de la red de celdas partiendo simplemente de las bases de datos que recogen la distribución de la población y la red de comunicaciones.

La capacidad de transporte de la célula está definida por tres parámetros: sección, longitud y dificultad. La población está representada por dos parámetros: el número de habitantes de la zona y el tiempo medio que tardan en estar listos para iniciar la evacuación. Además, cada celda recibe evacuados de las celdas anteriores y de ella parten hacia las celdas siguientes. A partir de estos parámetros y en función del número de evacuados que hay en cada momento en la celda se calcula la velocidad que se puede desarrollar en esas circunstancias de la evacuación y la densidad de personas, de forma que si se alcanza la densidad límite o aglomeración ya no se pueden acoger más evacuados hasta que la densidad disminuya. Una vía de comunicación viene representada por un conjunto de celdas idénticas, con población residente cero.

En cada celda se imponen las siguientes hipótesis:

El número de personas que cabe en una celda es limitado.

Una celda acepta todos los evacuados que lleguen a la misma, siempre que el número total sea inferior a la capacidad de la celda.

El número de personas que salen de una celda sólo está controlado por la capacidad de las celdas vecinas

La velocidad de tránsito depende sólo de la densidad de personas en la celda

El tiempo de permanencia en la celda depende de la dimensión de la celda y de la velocidad de tránsito.

La dirección de circulación está predeterminada. Cada celda tiene definidas dos entradas y dos salidas.

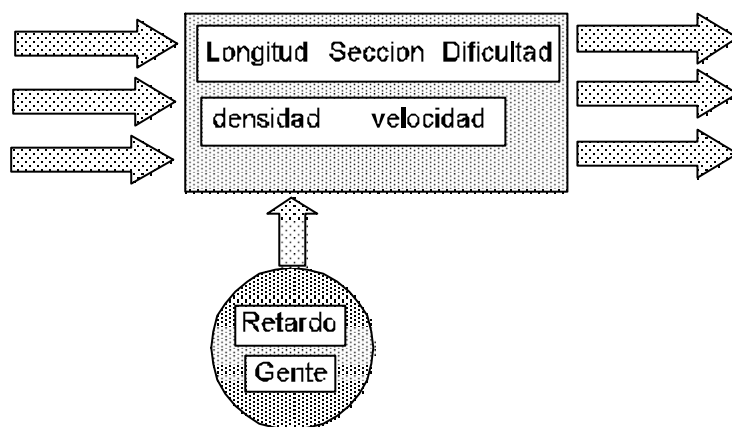


Figura 4-7 Estructura de la celda en el modelo de evacuación

El modelo se construye disponiendo que las celdas sigan exclusivamente la red de comunicaciones, adoptando el criterio de que todas ellas representen una longitud tal que sea inversamente proporcional a la dificultad del tramo. Dado que cada celda sólo tiene dos entradas y dos salidas, los puntos donde confluyen más de dos caminos deben representarse incluyendo celdas extras o desplazando el punto de unión a la celda anterior o a la celda siguiente (fig 4-8). Seguidamente, se asocia a cada celda el número de habitantes correspondiente a su zona de influencia. Aunque para obtener resultados realistas es necesario construir mallas con un número muy elevado de celdas, con modelos sencillos se obtiene ya una buena indicación de los puntos débiles de la red de evacuación. Los núcleos de acogida se representan mediante celdas de gran capacidad sin salida.

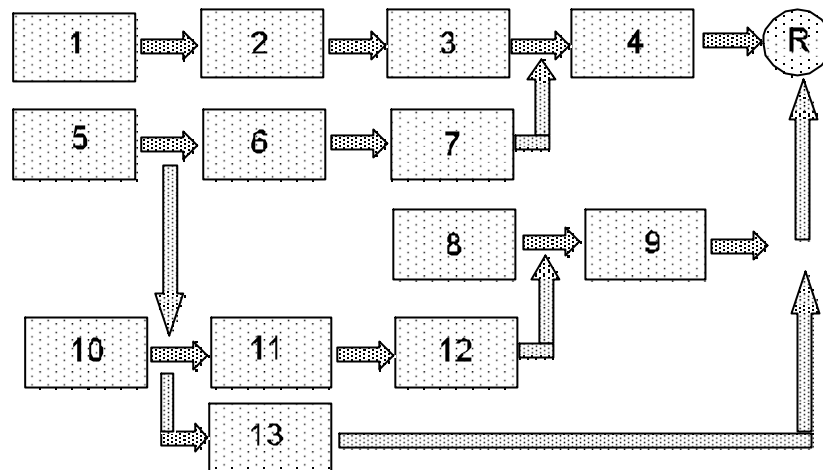


Figura 4-8 Ejemplo de red compleja en el sistema de evacuación.

El elevado número de celdas requerido por este simulador hace que sea muy importante simplificar al máximo las funciones matemáticas que intervengan en el cálculo para evitar que el tiempo de cálculo sea excesivo. La velocidad de evacuación se calcula de la misma forma para todas las celdas, la velocidad máxima está definida por el factor de dificultad del tramo. Para simplificar el cálculo se ha optado por mantener la velocidad constante mientras la densidad de evacuados sea inferior a un determinado valor y disminuir linealmente la velocidad a medida que aumente la densidad, hasta alcanzar la densidad máxima donde la velocidad vuelve a tomar un valor constante aunque muy pequeño (fig. 4-9).

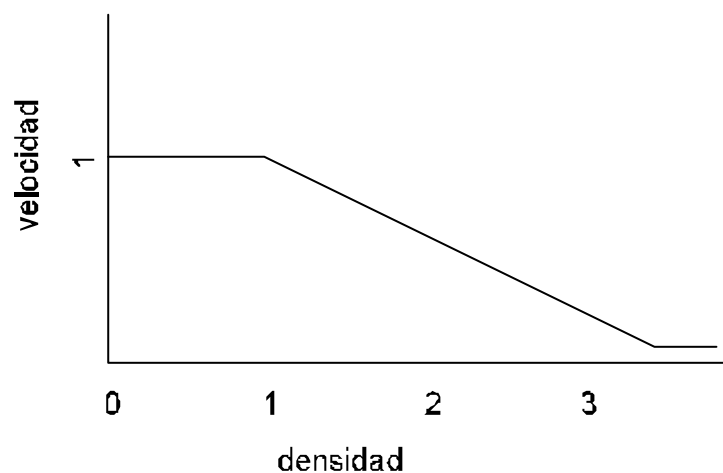


Figura 4-9 Función de velocidad de desplazamiento en función de la densidad de la celda en el simulador de evacuación

La expresión analítica de la velocidad de evacuación es:

$$\begin{aligned}
 V &= V_1 & \rho < \rho_1 \\
 V &= V_1 - \alpha (\rho - \rho_1) & \rho > \rho_1 \\
 V &= V_1 - \alpha (\rho_2 - \rho_1) & \rho > \rho_2
 \end{aligned}$$

Donde V es la velocidad y ρ la densidad. V_1 y α son los dos parámetros que definen el modelo. Para una evacuación a pie se utiliza la fórmula práctica:

$$\begin{aligned}
 V &= 1.0 & \rho < 1 \\
 V &= 1.4 - 0.4 \rho & \rho > 1 \\
 V &= 0.1 & \rho > 3.2
 \end{aligned}$$

donde la densidad es en personas/m² y la velocidad en m/s. Estos valores pueden resultar un poco elevados para poblaciones no habituadas a moverse colectivamente, por lo que deberán ajustarse con experiencias en la zona.

De acuerdo con la expresión de la velocidad es fácil calcular el flujo que puede obtenerse con cada densidad. En la figura 4-10 se muestra la curva obtenida a partir de valores anteriores. Para una densidad de 1.5 personas/m² se obtiene el flujo máximo, disminuyendo de forma rápida hasta la densidad límite de 3.2 personas/m².

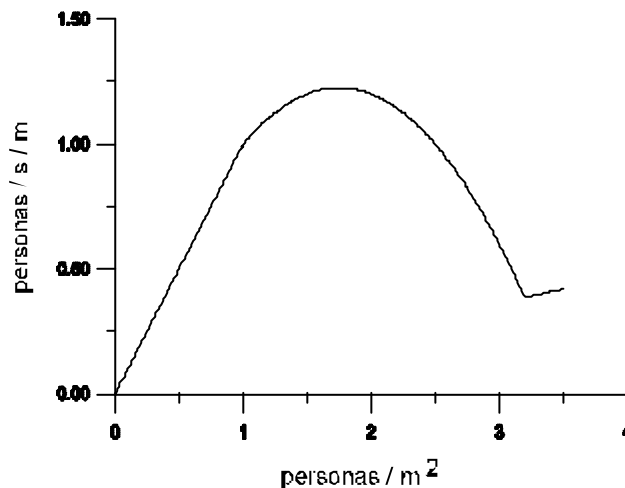


Figura 4-10 Flujo de personas en función de la densidad.

La función fuente, que expresa como se van incorporando personas a la evacuación se representa mediante una distribución normal, que es fácilmente calculable y refleja bastante bien el comportamiento real. El valor medio y la desviación estándar son dos parámetros que

se ajustan de forma independiente para cada una de las celdas. El número de personas que se incorporan a la evacuación en el tiempo t viene dado por:

$$P(t) = Q e^{-\left(\frac{t-t_0}{\tau}\right)^2}$$

donde Q es el número total de habitantes de la zona, t_0 el tiempo medio para incorporarse y τ la desviación estándar. Valores válidos para poblaciones habituadas se sitúan entorno a una hora para t_0 y 30 minutos para τ . Estos valores dependen fuertemente de cuando se decreta la evacuación, habiéndose comprobado que son de muy pocos minutos cuando se trata de evacuar un lugar de trabajo. Por el contrario, se incrementan tremendamente cuando el personal decide volver a su casa. Igual se aprecian importantes diferencias si la evacuación se realiza en horario laboral, en fin de semana, de día, de noche, etc. En cada caso, hay que estimar los parámetros en función de cada experiencia particular. En la realización práctica se ha sustituido el cálculo de la exponencial por una tabla que se calcula al inicio. De esta forma se obtiene una reducción considerable del tiempo de cálculo.

Hay que tener presente que el modelo admite que el tiempo necesario para recorrer una celda es igual al elemento de tiempo utilizado en el discretizado. Ello obliga a que las dimensiones de las celdas sean del orden de la velocidad media en la celda por el elemento de tiempo (tantas más celdas cuanto más dificultoso sea el paso). Esto exige que en el análisis de casos reales sea necesario utilizar siempre un gran número de celdas, lo que significa disponer de un ordenador de elevadas prestaciones. En aplicaciones de tipo educativo se suelen utilizar modelos con un número reducido de celdas.

4.2.2. Ejemplos de aplicación

El primer ejemplo es muy simple, pero permite familiarizarse con el manejo de los distintos parámetros. Se trata de evacuar una población a través de un único camino que atraviesa zonas de distinta dificultad (Fig 4-11).

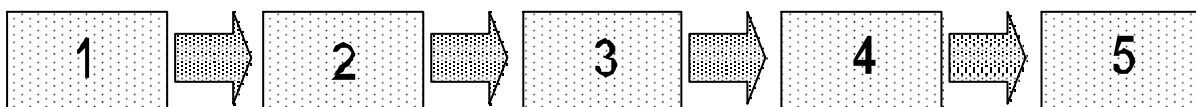


Figura 4-11 Ejemplo elemental de evacuación a través de una sola vía.

Este ejemplo se ha calculado dos veces, habiéndose variado sólo la sección de la celda 3 para poder evaluar la influencia que tiene el circular por una vía de mitad de sección. Los parámetros de las distintas celdas se recogen en la siguiente tabla:

N	Población	tiempo		camino		enlaces	
		medio	desviación	longitud	sección	principal	secundario
1	2000	200	60	1000	1000	2	0
2	0	0	0	1000	1	3	0
3	0	0	0	1000	1 .5	4	0
4	0	0	0	1000	1	5	0
5	0	0	0	1000	1000	0	0

Los resultados obtenidos (fig. 4-12) muestran en el primer modelo (A) que la evacuación se termina en 2500 pasos y que se produce una retención en la celda 2, pues el camino no puede acoger a todos los evacuados que van llegando procedentes de 1. En el segundo caso (B) continúa la retención en 2 pero la restricción del paso por 3, debida a la reducción de la sección, provoca un retraso en toda la operación que casi necesita doble tiempo para finalizar, apareciendo también una acumulación de evacuados en la celda 3.

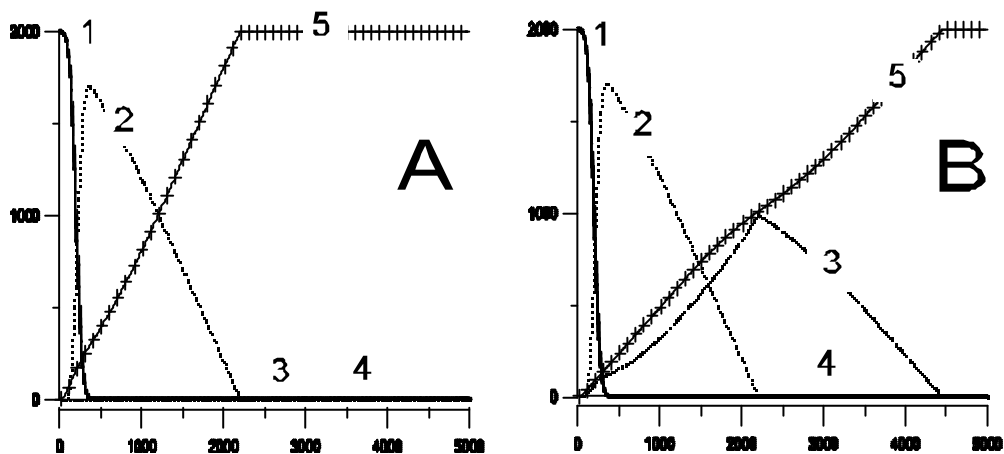


Figura 4-12 Evolución temporal de la población durante la evacuación.

El segundo ejemplo (fig. 4-13) considera una vía principal a la que confluyen varias vías secundarias. Los valores para los parámetros de las distintas celdas se presentan en la tabla:

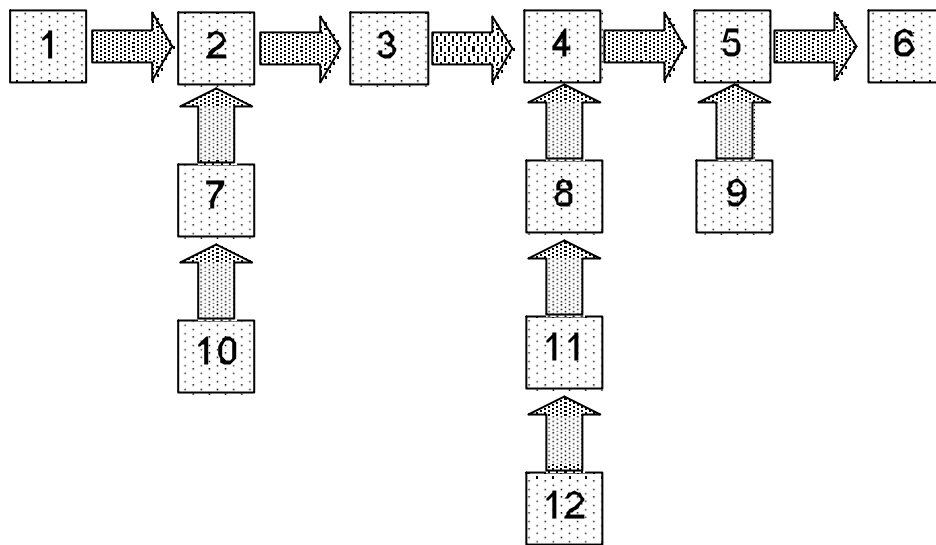


Figura 4-13 Modelo de evacuación de una serie de poblaciones unidas mediante vías secundarias a una vía principal

N	Población	tiempo		camino		enlaces	
		medio	desviación	longitud	sección	principal	secundario
1	2000	200	60	1000	1000	2	0
2	0	0	0	1000	1	3	0
3	0	0	0	1000	1	4	0
4	0	0	0	1000	1	5	0
5	0	0	0	1000	1	6	0
6	0	0	0	1000	1000	0	0
7	0	0	0	1000	1	2	0
8	0	0	0	1000	1	4	0
9	1000	200	60	1000	1000	5	0
10	1000	200	60	1000	1000	7	0
11	0	0	0	1000	1	8	0
12	1000	200	60	1000	1000	11	0

Los resultados presentan mayor complejidad que en el ejemplo anterior, en la figura 4-14 sólo

se ha representado la evolución temporal del número de evacuados para las celdas pertenecientes a la vía principal de evacuación. Se puede observar la aparición de varios picos correspondientes a la incorporación a la vía principal de los evacuados procedentes de las poblaciones situadas sobre las vías secundarias.

El estudio de casos reales con este tipo de simuladores exige la utilización de un elevado número de celdas, requiriéndose el soporte de un Sistema de Información Geográfica para la adecuada interpretación de la información aportada por el modelo. Para su aplicación práctica es necesario acoplar el modelo a un sistema de información geográfica de forma que los parámetros requeridos por el sistema neuronal puedan generarse directamente a partir de las bases de datos existentes. Para ello, es necesario realizar una serie de funciones auxiliares que permitan generar de un modo automático los ficheros que contienen los parámetros de definición de las respectivas celdas. La utilización de un Sistema de Información Geográfica de tipo abierto, permite incorporar el programa de simulación sobre el núcleo del sistema y obtener así directamente las salidas en forma de mapas de fácil interpretación. También deberá realizarse el módulo que convierta los ficheros de salida al formato requerido por el Sistema de Información Geográfica.

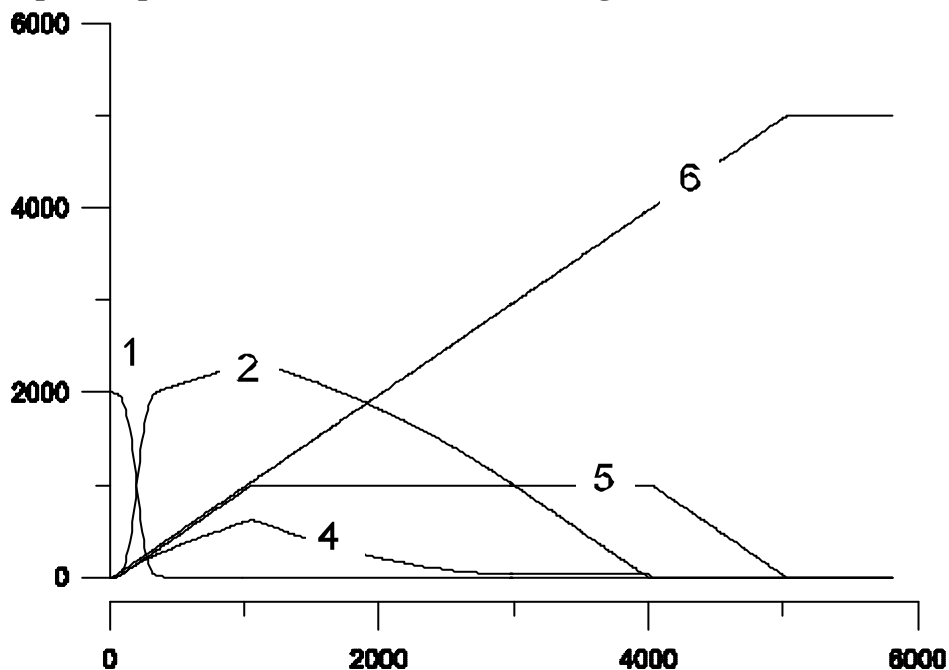


Figura 4-14 Evolución temporal del número de evacuados correspondiente al modelo de la figura 4-13

