

MODELO DE EVACUACIÓN A ESCALA VARIABLE. UNA HERRAMIENTA PARA LA GESTIÓN DE CRISIS VOLCÁNICAS APLICACIÓN A LOS VOLCANES TEIDE, CHICHÓN Y POPOCATÉPETL

José Manuel Marrero Llinares



MODELO DE EVACUACIÓN A ESCALA
VARIABLE. UNA HERRAMIENTA PARA LA
GESTIÓN DE CRISIS VOLCÁNICAS.

APLICACIÓN A LOS VOLCANES TEIDE,
CHICHÓN Y POPOCATÉPETL

Doctorando:

José Manuel Marrero Llinares

Directores:

Dr. José Antonio Rodríguez Losada

Dr. Ramón Ortiz Ramis

Departamento de Edafología y Geología
Facultad de Biología
Universidad de La Laguna

Agradecimientos

La realización de esta Tesis Doctoral ha sido posible gracias a la confianza que han depositado en mí, la ayuda prestada, los consejos y el conocimiento transmitido de mis directores José Antonio Rodríguez Losada y Ramón Ortiz Ramis.

También quiero agradecer la realización de esta Tesis al Departamento de Edafología y Geología de la Universidad de La Laguna donde he llevado a cabo los estudios de doctorado, por las enseñanzas recibidas y la buena acogida dispensada.

Me gustaría agradecer, de forma muy especial, a Alicia García, Joan Martí y Servando de la Cruz-Reyna por la paciencia y dedicación que han tenido conmigo durante mi aprendizaje en los conocimientos de vulcanología y gestión de crisis volcánicas.

Al Dipartimento di Scienze Geologiche, Università degli Studi di Catania y, especialmente, a los profesores Giuseppe Lombardo, Mario Cosentino y M. Serafina Barbano quiero agradecer su amabilidad y alegría innata que han hecho de mi estancia en Catania un recuerdo inolvidable, además de los conocimientos adquiridos. A Susanna Falsaperla del Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Catania que me ha facilitado el acceso al análisis de señales sísmicas del volcán Etna que me han ayudado a comprender la problemática del pronóstico de la actividad volcánica. A Giulio Zuccaro, Director del Centro Studi PLINIVS (Per L'INGegneria Idrogeologica Vulcanica e Sismica) dell' Università degli Studi di Napoli "Federico II" y Centro di Competenza Nazionale del Dipartimento della Protezione Civile, que me ha introducido en la metodología para la evaluación de las vulnerabilidades de las vías de comunicación.

A Roberto Quaas, Director del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) de México, por las facilidades dadas para la realización de esta memoria y a sus colaboradores Enrique Guevara y Oscar Cepeda con quienes he trabajado directamente en la preparación de la cartografía de los volcanes Popocatepetl y Chichón.

También quiero agradecer a Silvia Ramos, Directora del Laboratorio de Ciencias de la Tierra, Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas (UNICACH), por transmitirme su dedicación, energía y conocimientos en la atención y educación de las poblaciones expuestas a las amenazas de los volcanes Chichón y Tacaná. Debo agradecerle especialmente su invitación para participar en el ejercicio del Plan Operativo del Volcán Chichón 2009, que me ha servido para entender las dificultades que presentan las evacuaciones.

Al Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) por haberme brindado la posibilidad de trabajar en la problemática de los volcanes mexicanos Popocatepetl y Chichón y especialmente a M. Aurora Armienta por haberme introducido en el conocimiento de otros indicadores que permiten establecer una alerta temprana sobre la reactivación de un volcán.

Debo hacer especial mención al Ayuntamiento de Icod de los Vinos y a su Alcalde en 2004 Juan J. Dorta, sin cuya ayuda no habría sido posible iniciar este trabajo. Agradezco muy especialmente a Juan M. Contreras Tricás, Luis Botín Hernández y José Luis González Luis por su apoyo, entusiasmo e incansable trabajo, en un momento crítico como fue el año 2004 en ese Municipio, ... y por su amplio conocimiento de los "guachinches" de la zona de buen comida y mejor vino. Igualmente, al Departamento de Planes Insulares del Cabildo de Tenerife, donde aprendí el manejo de los Sistemas de Información Geográfica, gracias a Antonio Hernández y a su equipo de colaboradores.

A Carlos Dueñas que, junto a sus colaboradores de Protección Civil Nacional de España, me ha permitido discutir muchos aspectos de esta memoria y aportado valiosas sugerencias sobre planificación de evacuaciones.

Mi mayor agradecimiento al Sistema Nacional de Protección Civil de México, la Protección Civil del Estado de Chiapas y la Protección Civil del Estado de México por su disponibilidad y colaboración. Debo citar expresamente a Esteban Ramos Jiménez cuya colaboración ha sido imprescindible para analizar la evacuación de diciembre de 2000 en el volcán Popocatepetl y a Fernando de la Torre, Alfredo Chan Chin, Salvador Cervantes y Adriana G. Hernández Ramírez, con quienes compartí la experiencia de la evacuación del poblado Viejo Volcán en el ejercicio para Plan Operativo del Volcán Chichón 2009.

A Carmen Fernández Gibbs, Directora de la Oficina Nacional de Emergencias del Ministerio del Interior de Chile, por el soporte que siempre ha brindado a nuestro grupo. A Juan Cayupi, técnico de ONEMI para el riesgo volcánico, con quien he analizado y discutido los planes de emergencia.

A Hugo Moreno, del SERNAGEOMIN, Chile, por su dedicación durante mi estancia en el Observatorio Volcanológico de los Andes del Sur, gracias a la cual he podido conocer los volcanes chilenos, de innegable belleza, Villarrica, Llaima y Osorno y su influencia en el desarrollo turístico de su entorno.

A Minard Hall y Patricia Mothes del Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica de Ecuador, con quien hemos discutido diversos aspectos de la gestión del riesgo volcánico de los volcanes de Ecuador y del volcán Teide durante su estancia en Tenerife.

No me puedo olvidar de los compañeros del Departamento de Volcanología del Museo Nacional de Ciencias Naturales (CSIC), Grupo de Volcanología del Instituto de Ciencias de la Tierra Jaume Almera (CSIC), sección de volcanología del Instituto Geográfico Nacional y Casa de los Volcanes de Lanzarote, con quienes además de trabajar he compartido muchas cenas y copas.

En el plano personal destacan mi familia, mis amigos, la empresa en la que trabajo actualmente (Moviten) y a la mejor inversión que han realizado mis padres, *el apartamento del sur*.

Mi familia porque siempre he recibido su apoyo, no solo durante la elaboración de la tesis, sino desde que empecé a estudiar. El apoyo recibido ha sido triple, emocional, económico y logístico, de hecho, pese a tener 36 años sigo viviendo con ellos. Ellos son el principal valedor de este trabajo, sin su guía posiblemente hubiera acabado haciendo otras cosas.

A mis amigos, porque muchos de ellos no se acuerdan cuando empecé a hacer la tesis, lo único que recuerdan es que siempre estaba “liado y no podía salir” porque tenía que trabajar, aunque siempre que he podido lo he hecho, que conste. Espero poder dedicarles un poco más de tiempo a partir de ahora.

A la empresa en la que trabajo actualmente y en especial a Antonio Afonso. Su apoyo y facilidades me ha permitido disponer de la independencia económica necesaria, fundamental para mi salud mental, y del tiempo para seguir en contacto con el mundo de la ciencia, aunque obviamente todo ello ha implicado un esfuerzo doble. Igualmente, a mis compañeras de trabajo, por su apoyo y por saber escuchar cuando ha hecho falta, pero sobre todo por su paciencia por las veces que he subido el tono de voz debido al estrés y cansancio.

Finalmente, al *apartamento del sur* que pasó de convertirse del lugar de fin de semana al que iba con mi ex-pareja a... descansar, al sitio en el que hemos escritos varias publicaciones, entre ellas esta tesis. Bueno, espero poder visitarlo en otras circunstancias distintas a las actuales, no solo de trabajo vive el hombre.

Gracias a todos

José Manuel Marrero Llinares

Índice de contenido

Abstract.....	3
Presentación.....	7
1Introducción, gestión de crisis y modelos de evacuación.....	13
1.1Introducción.....	13
1.1.1Gestión de Crisis Volcánicas.....	13
1.1.2Fase de crisis en la gestión de crisis volcánicas.....	24
1.1.3Activación del Plan de Emergencia.....	30
1.2Ejercicios y simulacros.....	34
1.3Integración en el sistema de gestión europeo de crisis volcánicas.....	38
1.4Modelos de evacuación.....	39
1.4.1Huracán versus volcán.....	41
1.5Elementos de los modelos de evacuación.....	44
1.5.1El comportamiento de la población ante evacuaciones	44
1.5.2Tiempo de movilización.....	48
1.5.3Tiempo de viaje.....	49
1.5.4Tiempo de evacuación.....	50
1.5.5Número de viajes generados y lugares de destino.....	51
1.5.6Elección de las rutas de escape.....	52
1.5.7Gestión de las intersecciones o cruces viarios.....	54
1.5.8Punto de partida.....	55
2Metodología.....	59
2.1Introducción.....	59
2.2Escenarios para la gestión de crisis volcánicas.....	60
2.2.1Percepción del riesgo y definición de escenarios	65
2.3Tiempos calculados.....	68
2.3.1Tiempo de movilización.....	68
2.3.2Tiempo de viaje.....	68
2.3.3Tiempo de evacuación.....	69
2.4Diseño de la estructura de datos.....	69
2.4.1Cartografía y bases de datos.....	70
2.4.2Estructura de los datos.....	72
2.4.3Diseño de los cruces.....	75
2.4.4Vulnerabilidades de las vías de comunicación.....	77
2.4.5Zonificación.....	80
2.5Metodología para la preparación de datos	81
2.5.1Datos disponibles y preparación para el volcán Teide.....	81
2.5.2Datos disponibles y su preparación para el volcán Chichón, México.....	91
2.5.3Datos disponibles y preparación para el volcán Popocatépetl, México.....	92
2.6Desarrollo del motor de evacuación.....	92
2.6.1Entrada de datos y objeto punto.....	94
2.6.2Rutas de evacuación, LIFO.....	96

2.6.3Desplazamiento de la población.....	97
2.6.4Salida de información.....	100
2.7Preparación del fichero de configuración.....	101
2.7.1Modelo de velocidad.....	103
2.7.2Modelo de comportamiento de la población.....	103
3Aplicación al volcán Teide.....	107
3.1Introducción.....	107
3.2Características.....	108
3.3La actividad eruptiva futura.....	109
3.4Aplicación del Cuestionario del USGS.....	112
3.5Distribución de la población y red viaria.....	114
3.6Plan de Emergencia.....	119
3.7Diseño de escenarios de evacuación.....	120
3.8Modelización.....	131
3.9Resultados obtenidos.....	145
3.9.1Tiempo de movilización.....	145
3.9.2Tiempo de viaje.....	146
3.9.3Tiempo de evacuación.....	146
3.9.4Circulación.....	149
4Aplicación al volcán Chichón.....	153
4.1.1Introducción.....	153
4.2Características.....	154
4.3La erupción del 1982.....	155
4.4Aplicación del Cuestionario del USGS.....	157
4.5Estado actual y distribución de la población.....	158
4.6Plan de Emergencia.....	163
4.7Ejercicio para la evaluación del Plan de Emergencia.....	164
4.7.1Objetivos.....	164
4.7.2Papel del Comité Científico Asesor.....	165
4.7.3Desarrollo.....	167
4.7.4Escenarios eruptivos.....	172
4.8Diseño de escenarios de evacuación.....	176
4.9Modelización.....	184
4.10Resultados obtenidos.....	191
4.10.1Tiempo de movilización.....	191
4.10.2El tiempo de viaje.....	192
4.10.3Tiempo de evacuación.....	192

5	Aplicación al volcán Popocatépetl.....	195
5.1	Introducción.....	195
5.2	Características.....	196
5.3	La actividad eruptiva en la actualidad.....	199
5.4	Aplicación del cuestionario USGS.....	200
5.5	Distribución de infraestructuras y población.....	204
5.6	Plan de emergencia.....	209
5.7	Diseño de escenarios.....	209
5.8	Modelización.....	221
5.9	Resultados obtenidos.....	221
6	Recomendaciones.....	225
6.1	Objetivos de diseño, obtención y uso de datos estadísticos.....	225
6.2	Georreferenciación de la población.....	226
6.3	Controlar administrativamente la totalidad de la red de comunicaciones.....	227
6.4	Control espacial – control de la población.....	227
6.5	El sistema de referencia de la cartografía.....	228
6.6	Criterios de elaboración cartográficos.....	228
6.7	Manejo de las cartografías digitales.....	229
6.8	Conocer la zona de estudio.....	229
6.9	Problemas del cálculo de vulnerabilidades.....	229
6.10	Recopilación de datos en las evacuaciones.....	230
6.11	Grado de incertidumbre en las evacuaciones.....	230
6.12	Diseño de escenarios y mitigación del riesgo.....	230
6.13	Sugerencia Final.....	231
7	Conclusiones.....	235
8	Conclusions.....	241
	Apéndices.....	247
A.	Apéndice scrips GIS.....	247
B.	Apéndice. Funciones C++ utiliza Borland Builder 6.....	251
C.	Apéndice. Cuestionario USGS.....	262
	Bibliografía.....	265

Índice de tablas

Tabla 1: Índice de Explosividad Volcánica (Simkin and Siebert, 1994).....	12
Tabla 2: Ejemplo de datos utilizados para el volcán Chichón, México, donde la resolución de la información disponible sólo cubre el núcleo de población como un punto en el espacio. La cartografía y la escala general utilizada no permiten ampliar el detalle de los datos.....	78
Tabla 3.: Distribución de la población por proximidad al centro de emisión del volcán Teide. El añadido comp. corresponde al número de habitantes cuyos núcleos de población están englobados por uno de los anillos. El añadido par. corresponde al número de habitantes cuyo municipio queda dividido por uno de los anillos.....	124
Tabla 4: Tipologías, parámetros y datos generales de las simulaciones aplicadas al municipio de Icod de los Vinos, Tenerife.....	137
Tabla 5: Número de zona, superficie y población contenida.....	144
Tabla 6: Número de zona, superficie y población contenida.....	144
Tabla 7: Evolución de la primera hora en la simulación realizada con la distribución zonal 1 y bilobulada de 15 minutos y 4 horas. Dado que el simulador calcula fracciones de persona, hay ligeros desajustes debido al redondeo.....	157
Tabla 8: Tiempo de viaje inicial en horas de la distribución zonal 1 calculado a partir del punto más alejado de cada zona respecto a la salida del área de evacuación asignada.....	158
Tabla 9: Tiempo de viaje inicial en horas de la distribución zonal 2 calculado a partir del punto más alejado de cada zona respecto a la salida del área de evacuación asignada.....	158
Tabla 10.: Población indígena en el estado de Chiapas.....	174
Tabla 11: Estimaciones del CONAPO con base en el II Censo de Población y Vivienda 2005 y Encuesta Nacional de Ocupación y Empleo 2005 (IV Trimestre).....	176
Tabla 12.: Distribución de la población por proximidad al centro de emisión del volcán Chichón, Chiapas, México. Se refleja el grado de dispersión (localidades menores de 1000 habitantes).	177
Tabla 13.: Parámetros de configuración de los modelos utilizados.....	191
Tabla 14.: Tipologías, parámetros y datos generales de las simulaciones aplicadas al entorno del volcán Chichón, Chiapas, México. Enero 2009.....	197
Tabla 15: Número de zona, superficie y población residente en la zona. Sólo se ha asignado la población de las localidades contenidas en los 15 primeros km.....	200
Tabla 16.: Número de zona, superficie y población contenida. Sólo se ha asignado la población de las localidades contenidas en los 15 primeros km.....	201
Tabla 17.: Actividad volcánica del Popocatepetl registrada en los últimos 23000 años (CENAPRED).....	216
Tabla 18: Distribución de la población por proximidad al centro de emisión del volcán Popocatepetl, estado y grado de dispersión (localidades menores de 1000 habitantes).....	226
Tabla 19.: Municipios del Estado de México por donde discurren las rutas de evacuación utilizadas (INEGI, censo de población de 2005).....	227
Tabla 20: Vehículos disponibles para la evacuación del día 19/12/2000.....	234
Tabla 21.: Relación de poblaciones y número de personas evacuadas el 19 de diciembre de 2000, según datos de la Protección Civil del Estado de México.....	235
Tabla 22.: Distribución y evolución del número de evacuados en los albergues durante los días que duró la evacuación (Protección Civil Estado de México).....	236
Tabla 23: Tipologías, parámetros y datos generales de las simulaciones aplicadas a las localidades situadas en el entorno del volcán Popocatepetl, en el Estado de México.....	238

Índice de ilustraciones

Figura 1: Organigrama para la Gestión de una Crisis Volcánica.....	10
Figura 2: Inicio de la erupción del volcán Llaima, 1 enero de 2008 (Foto: Observatorio Volcanológico de los Andes del Sur, Chile, 2008).....	11
Figura 3.: Actualmente, el único método cuantitativo para el pronóstico de erupciones está basado en el fallo del material (FFM, Voight, 1988). Según este modelo, los observables ligados a la actividad volcánica se aceleran poco antes de la erupción, siguiendo una hipérbola. A efectos prácticos, se representa el inverso de la variación del observable, con lo que se obtiene una recta que corta al eje de tiempos en el momento esperado de la erupción.	12
Figura 4.: Pronóstico del inicio de la erupción del volcán Llaima en enero de 2008, realizado en el Departamento de Volcanología del CSIC mediante el método del FFM, utilizando la evolución del inverso de la energía sísmica liberada (RSAM). Obsérvese que el pronóstico de la erupción sólo es evidente 12 horas antes..	13
Figura 5.: Cuando el acceso al volcán es muy peligroso se han ideado métodos para desplegar la instrumentación complementaria sin exponer a los técnicos. La imagen muestra una estación sísmica contenida en un proyectil que se lanza desde un helicóptero (Foto J.M. Marrero, 2007).....	14
Figura 6.: Árbol de eventos adaptado para la automatización de la gestión de la emergencia (modificado de Newhall y Hoblitt, 2002).....	18
Figura 7: Ejemplo de elaboración de un mapa de susceptibilidad para los volcanes del área central de Japón (Jaquet, 2006).....	20
Figura 8.: Cálculo de la susceptibilidad para los volcanes de Japón (Jaquet, 2006).....	20
Figura 9: Mapa de peligrosidad por flujos de lava para la isla de Tenerife. Establecido considerando que la probabilidad de apertura de un nuevo centro es proporcional al número de conos recientes. Se calculan todos las posibles trayectorias que puedan tomar los flujos de lava (Felpeto, 2002).....	22
Figura 10: Reunión del equipo científico del Instituto Geofísico y la Protección Civil de Ecuador con los representantes sociales de las poblaciones afectadas por el Volcán Tungurahua 2003. Estas reuniones forman parte de la estrategia educativa para la difusión del Plan de Emergencia (Foto R. Ortiz).....	24
Figura 11.: Evolución de la actividad sísmica en el volcán St. Helens antes de la erupción de 2004. Obsérvese que la actividad del volcán se limita a mostrar sismicidad superficial hasta pocas horas antes del inicio de la erupción (USGS, 2004).....	25
Figura 12: Proceso de elicitación destinado a obtener opiniones consensuadas en Comités Científicos con graves divergencia de opiniones.....	27
Figura 13.: Utilización de la aplicación MSBNx para estimar la probabilidad de colapso del domo durante la erupción del volcán Soufriere Hills en la isla Montserrat (Aspinall et al., 2003).....	28
Figura 14.: Evolución del árbol de eventos en base a un proceso de elicitación de expertos, utilizado en la gestión de la crisis volcán Soufriere Hills de la isla Montserrat. En rojo se indica el proceso seguido por el volcán (Aspinall, 2006).....	32
Figura 15: Mediante la combinación de la información disponible y la valoración del grupo de expertos, se van obteniendo escenarios. Éstos son modificados a medida que se reciben nuevos datos. Los escenarios se envían a Protección Civil en un formato simplificado para que sea fácilmente comprensible.....	34
Figura 16: Simulación de un flujo lávico en el volcán Etna, Italia (Damiani et al., 2006).....	35
Figura 17: Ejemplo de modelo de evacuación utilizando el programa OREMS, desarrollado en el Center for Transportation Analysis Research Brief (CTA), en Oak Ridge, Estados Unidos.....	37
Figura 18: Horquilla para la toma de decisiones, obtenida mediante elicitación de expertos, durante el ejercicio MEXIMEX de simulación de evacuación del área próxima al volcán Vesubio, Italia (Woo, 2008).....	38
Figura 19: El tiempo que transcurre, una vez iniciada la erupción hasta la emisión del primer flujo piroclástico de más de 5 km de recorrido, en general es muy breve, menos de 12 horas en la mayoría de los volcanes (Tomblin y Michael, 1978). En base a estos datos, cuando en un volcán se está gestionando una crisis en cuyo árbol de eventos está contemplada esta posibilidad, debe realizarse siempre una evacuación preventiva, no puede esperarse a que se inicie la erupción.....	39
Figura 20: Interrupción de las vías de comunicación por caída de cenizas durante la erupción del volcán Chichón, México, en 1982. La imagen corresponde a la población de Pichucalco, situada proximadamente a 20 km en línea recta del volcán. (foto S. De la Cruz-Reyna).....	40
Figura 21: Proceso de percepción del riesgo por parte de la población. La complejidad de este proceso hace muy difícil pronosticar su comportamiento.....	41
Figura 22: Ejercicio MESIMEX: discusión en el grupo de síntesis al obtener unos resultados inesperados en la simulación de la caída de cenizas, consecuencia de unas condiciones meteorológicas anómalas. (Foto R.	

Ortiz, 2006).....	41
Figura 23: Mapas generados por el VAAC de Toulouse (Francia), para una erupción simulada durante un ejercicio organizado por el CSIC en Olot (Girona, España).....	43
Figura 24: Uno de los problemas que se plantea en los centros de acogida y refugio es el estrés al que está sometida la población, especialmente los niños. Hay que tener previsto actividades lúdicas para entretenerlos. La imagen recoge un payaso en un punto de registro (check point) durante el ejercicio MEXIMEX (Foto, R. Ortiz, 2006).....	44
Figura 25: En el modelo de Lu et al., 2003 convierten los diferentes espacios en nodos, a los que se les asigna una capacidad máxima e inicial y las rutas de salida en vectores, con una capacidad máxima de paso y un tiempo de recorrido.....	46
Figura 26: Trayectoria y evolución del huracán Katrina, del 25 al 30 de agosto de 2005 (Foto NASA y trayectoria por el National Hurricane Center, USA).....	47
Figura 27: Periodos de retorno para las erupciones según su índice de explosividad volcánica VEI (Simkin and Siebert, 1994).....	49
Figura 28: Modelo simplificado del comportamiento de la población a partir del momento en el que se publica la orden de evacuación (Modificado de Jonkman, 2003 en Frieser 2004).....	51
Figura 29: A medida que aumenta el número de afectados, la gestión de la emergencia requiere mayor organización. La imagen muestra la complejidad del Centro de Atención instalado en un polideportivo durante la gestión del terremoto del 6 de abril de 2009 en la región de Abruzzo. (Foto Protección Civil. Italia).....	52
Figura 30: Durante una evacuación es necesario que la población recupere la normalidad lo antes posible. El funcionamiento de las escuelas para los evacuados es una de estas prioridades. La imagen recoge una escuela en una tienda de campaña utilizada en la atención de los afectados por el terremoto de Abruzzo de 6 de abril de 2009. (Foto Protección Civil. Italia).....	53
Figura 31.: En una isla como Tenerife puede organizarse una autoevacuación (en azul) cuyo destino esté situado en las infraestructuras hoteleras del sur de la isla. Las personas pueden optar por otros destinos en función del lugar en el que se encuentren sus familiares, segundas residencias, etc, (en amarillo), pero la ruta principal a seguir es la misma.....	56
Figura 32: Campamentos de caravanas en las que se alojó a los evacuados durante la crisis bradisísmica de la caldera de Campi Flegrei, Italia, 1983-1985. Los evacuados vivieron durante casi tres años en estas condiciones (Foto R. Ortiz, 1984).....	57
Figura 33: Diagrama utilizado para la planificación de evacuaciones, donde se destaca la necesidad de coordinación con los agentes locales.....	59
Figura 34.: Estrategias para reducir los conflictos en los cruces. La situación d sería la ideal, en la que puede establecerse un flujo continuo. Analizando las características del cruce, puede incluirse en los Planes de Emergencia la gestión más adecuada del mismo (Modificado en Cova y Johnson, 2003).....	60
Figura 35: Erupción del volcán Tungurahua, Ecuador, en 2003 disparada por un sismo ocurrido horas antes. Intercambio Científico Dep. Volcanología CSIC – Instituto Geofísico de Ecuador.....	68
Figura 36: Factores a tener en cuenta para el diseño de escenarios de evacuación (Marrero et al., 2008).....	70
Figura 37: Uno de los programas mas ambiciosos de la Década para la Mitigación de los Desastres Naturales, propiciada por Naciones Unidas, fue el de Volcanes de la Década donde se concentró la investigación volcanológica durante 10 años. Entre ellos figura el volcán Teide, Tenerife, España. (USGS).....	71
Figura 38: Accesos a la página WEB del USGS Earthquake Hazards para obtener información inmediata sobre un terremoto sentido de magnitud 5, ocurrido en el estado de Washington, USA, el 10 de junio de 2001. Obsérvese el fuerte incremento de accesos inmediatamente después de la ocurrencia del terremoto. Internet es actualmente la primera fuente de información inmediata sobre desastres y se está convirtiendo en una potente herramienta educativa para minimizar sus efectos (http://bort.caltech.edu/).....	73
Figura 39: Asociación y georeferenciación de información en el SIG. Según las características de los datos, tanto en las bases de datos como en la cartografía digital, se podrán obtener asociaciones a distintos niveles de detalle.....	77
Figura 40: La vulnerabilidad frente a eventos sísmicos se establece simplemente admitiendo que el edificio o muro colapsará afectando una distancia igual a su altura.....	79

Figura 41: Los cruces-buffer que aparecen en azul corresponden al fin de vía, éstos no son tenidos en cuenta como cruces. Los puntos contenidos mantienen el valor 0 en el campo Id_cruce.....	81
Figura 42: El cruce-buffer de color morado se encuentra situado por debajo de los anteriores. Al realizar la asociación espacial no hay ningún punto que quede incluido en él. Es importante identificarlos para anularlos.....	82
Figura 43: Protección Civil, Italia. Evaluación de la vulnerabilidad de las estructuras próximas a las vías de comunicación. (Foto: R. Ortiz 2006, MESIMEX).....	83
Figura 44: Ejemplo de vulnerabilidad sísmica para las vías de comunicación de Portici, Nápoles (Italia), MESIMEX 2006.....	84
Figura 45: Vulnerabilidad por flujos. En este caso, un lahar ha cortado la carretera y se ha construido un puente provisional. Volcán Tungurahua, Ecuador 2003 (Foto R. Ortiz).....	85
Figura 46: Ejemplo de zonificación y cruces de enlace.....	86
Figura 47: Combinación de cartografías para obtener la capa de edificaciones definitiva: A, escala 1:1000 del año 2002, GRAFCAN. B, escala 1:5000 del año 1996, GRAFCAN. C, escala 1:1000 del 2004, Catastro. D, resultado final.....	88
Figura 48: Esquema cartográfico final obtenido tras la aplicación de la metodología desarrollada.....	89
Figura 49: En ocasiones es posible obtener información institucional sobre las características del tráfico. Sin embargo suele estar referida sólo a las vías principales. La figura corresponde a las estaciones de medida situadas en las vías principales de conexión entre el valle de la Orotava y el valle de Icod de los Vinos (Scaini, 2009).....	90
Figura 50: Ejemplo de vía de comunicación con dos nombres, uno a cada lado de la acera. Para digitalizarla se duplicó el registro original y se desplazó ligeramente. Luego se unieron los extremos. Debe comprobarse que los cruces en los extremos son los correctos.....	93
Figura 51: La vía de comunicación A, parece que se comunica directamente con la vía B, pero en realidad están separadas. Se han corregido manualmente los cruces-buffer que aparecen; en el primer caso, porque se aproximan demasiado, en el segundo, porque la vía A cruza sobre la B mediante un puente, sin que se toquen.....	94
Figura 52: La plaza no tiene personas registradas con esa dirección en el padrón de habitantes. En este caso, podemos aislarla deshabilitando el cruce o tratarla como una vía de comunicación con salida única.....	95
Figura 53: La dificultad de trabajar a escala de detalle hace que la aplicación de los cruces requiera numerosas fases de filtrado y revisión, de ahí la complejidad de la leyenda resultante.....	96
Figura 54: Diagrama bloque del software de evacuación.....	99
Figura 55: Diagrama de flujo, entrada de datos y carga de los objetos punto.....	101
Figura 56: Diagrama de flujo del funcionamiento de la LIFO.....	104
Figura 57: Diagrama de flujo del proceso de evacuación.....	106
Figura 58: La transferencia de una celda a otra depende de la velocidad por la que se circule por ella. El numero de iteraciones necesarias es igual al discretizado espacial dividido por la velocidad por el discretizado temporal $n = dl/vdt$	107
Figura 59: Configuración del área de trabajo.....	110
Figura 60: Establecimiento de la prioridad de evacuación.....	111
Figura 61: Configuración de la función de pánico.....	112
Figura 62: Modelo de velocidades.....	112
Figura 63: La representación del comportamiento de la población mediante distribuciones normales permite controlar tanto el tiempo medio como la dispersión. La figura muestra dos distribuciones con tiempo medio de 4 horas y dispersiones de 1 y 4 horas	113
Figura 64: Modelo de comportamiento de la población, que representa el tiempo de reacción y preparación mediante superposición de distribuciones normales.....	114
Figura 65: Situación de las islas Canarias, España y localización del volcán Teide, en la isla de Tenerife.	117
Figura 66: Zona central de la isla de Tenerife, según el modelo digital del terreno del Instituto Geográfico Nacional (IGN) de 25 metros. En el centro de la imagen destaca el volcán Teide y la Caldera de Las Cañadas.	

Obsérvese las fuertes pendientes del flanco norte del volcán sobre la población de Icod de los Vinos.....	118
Figura 67: De izquierda a derecha, Pico Viejo, Teide y Montaña Blanca, una de las últimas erupciones explosivas ocurridas hace menos de 2000 años (Carracedo et al., 2003, 2007).....	119
Figura 68: Árbol de eventos para el sistema volcánico Teide-Pico Viejo (modificado en Martí et al., 2008a). Los valores mostrados, indican la horquilla de probabilidad asignada por el grupo de expertos, a partir del método de elicitación, en función de los datos disponibles.....	120
Figura 69: Pico Viejo es uno de los grandes estratovolcanes del sistema central de Tenerife. (Foto. J. M. Marrero)	121
Figura 70: Ejemplo de mezcla física de magmas en lavas del sistema Teide - Pico Viejo. (Foto R. Ortiz).....	123
Figura 71: El volcán Teide desde la zona alta del municipio de Icod de los Vinos, Tenerife. (Foto J. M. Marrero)	126
Figura 72: Distribución de la población en función de la distancia al volcán. La máxima distancia alcanzable en la Isla de Tenerife, unos 60 km, corresponde al Macizo de Anaga, situado en el extremo este.....	128
Figura 73: Mapa de localización de la zona de trabajo, el municipio de Icod de los Vinos, con un detalle de la escala de análisis utilizada.....	129
Figura 74: Flujo piroclástico originado por la fragmentación del frente de colada de lava, debido a un cambio brusco de la pendiente durante la erupción del volcán Teneguía, La Palma 1971 (foto V. Araña).....	133
Figura 75: Proyecto educativo Canarias Tierra Viva, donde un alumno dibuja una isla con un volcán en actividad (Foto: M. A. Llinares)	136
Figura 76: Esquema de simulación para el municipio de Icod de los Vinos, Tenerife, próximo al volcán Teide. Las simulaciones corresponden a autoevacuaciones, con capacidad variable de las vías de comunicación. Se han añadido simulaciones puntuales con capacidad homogénea para comparar los resultados y observar el comportamiento del modelo.....	142
Figura 77: Distribución Zonal 1. Esta distribución se adapta a la tendencia habitual del tráfico diario, que confluye en la vía principal situada en la zona norte del municipio. La salida se realiza en dirección este, hacia Santa Cruz de Tenerife, capital de la isla. Los números de zona corresponden al valor del cruce de salida que poseen.....	143
Figura 78: Distribución Zonal 2. Esta distribución busca la salida más próxima al lugar de residencia en función de la localización de las principales carreteras. La salida se realiza en dirección este y oeste en el supuesto de que la zona de destino estuviera situada en el sur de la isla. Los números de zona corresponden al valor del cruce de salida que poseen.	143
Figura 79: Representación gráfica del escenarios 1, con variación en el tiempo medio de incorporación. Datos globales de llegada al destino, personas preparadas para evacuar, circulando, kilómetros de vías con circulación lenta y kilómetros de vías con bloqueos.....	145
Figura 80: Representación gráfica del escenarios 2, con variación en el tiempo medio de incorporación. Datos globales de llegada al destino, personas preparadas para evacuar, circulando, kilómetros de vías con circulación lenta y kilómetros de vías con bloqueos.....	146
Figura 81: Funciones de comportamiento de la población para el escenario 1.....	147
Figura 82: Funciones de comportamiento de la población para el escenario 2.....	148
Figura 83: Número de personas en espera para el escenario 1.....	149
Figura 84: Número de personas en espera para el escenario 2.....	150
Figura 85: Número de personas en circulación para el escenario 1.....	151
Figura 86: Número de personas en circulación para el escenario 2.....	152
Figura 87: Kilómetros de vía con circulación lenta para el escenario 1.....	153
Figura 88: Kilómetros de vía con circulación lenta para el escenario 2.....	154
Figura 89: Kilómetros de vía bloqueada para el escenario 1.....	155
Figura 90: Kilómetros de vía bloqueada para el escenario 2.....	156
Figura 91: Para observar la respuesta del modelo ante las retenciones, se han repetido las simulaciones de la distribución zonal 1 con bilobulada de 15 minutos y 4 horas y monolobulada de 1 hora con incorporación en simultáneo.....	161
Figura 92: Calle del núcleo de población principal del municipio de Icod de los Vinos. Tenerife, España. (Foto: J.M.	

Marrero).....	163
Figura 93: Escenario 1, distribución zonal 1, simulación con función de comportamiento de la población normal bilobulada de 15 minutos y 4 horas. Evolución de los bloqueos durante las dos primeras horas. Los bloqueos se sitúan en las principales vías de comunicación del municipio a medida que se sobrecargan.	165
Figura 94: Vista aérea del cráter del volcán Chichón, México, en la que se puede observar el lago cratérico y emisión fumaroliana (foto R.Ortiz, 2002)	168
Figura 95: Situación del Estado de Chiapas, México y localización del volcán Chichón.....	169
Figura 96: La columna inicial de la erupción del volcán Chichón, obligó al cierre de dos aeropuertos, situados a 70 km del volcán en Tuxtla Guitierrez, Estado de Chiapas, y Villahermosa, Estado de Tabasco, y al corte de numerosas carreteras, imposibilitando el acceso a la zona (De la Cruz-Reyna y Del Pozzo, 2009) (Foto S. De la Cruz-Reyna, 1982).....	170
Figura 97: Fotografía del volcán Chichón, Chiapas (México), en 1981. Obsérvese el impresionante domo que rellena el cráter. (Foto: Rene Canul. Comisión Federal de Electricidad)	171
Figura 98: Muestreo de aguas por miembros del Instituto de Geofísica de la UNAM y Departamento de Ciencias de la Tierra de la UNICACH (Foto R. Ortiz, 2002).....	173
Figura 99: Distribución de la población en el área próxima al volcán Chichón, Chiapas, México. Los anillos corresponden a distancias de: 10, 30, 40, 80 y 100 km.....	181
Figura 100: Restos del poblado El Naranjo destruido por flujos piroclásticos en la erupción de 1982 del volcán Chichón (México). (Foto S. de la Cruz-Reyna).....	182
Figura 101: Mapa de situación del entorno del volcán Chichón, Chiapas, México. Durante el ejercicio se evacuó a la población de Viejo Volcán a Chapultenango. A pesar de la poca distancia entre ambas poblaciones, la situación de peligro es muy distinta, pues Chapultenango está protegida del impacto directo por obstáculos orográficos y sólo puede verse afectada por caída de cenizas.....	185
Figura 102: Uno de los carteles utilizados para indicar la ruta de evacuación. Obsérvese que el cartel fue colocado mucho antes de la preparación del ejercicio de evacuación. Estos carteles son renovados periódicamente (Foto J.M. Marrero, 2009).....	186
Figura 103: La cubierta de la iglesia de Chapultenango, Chiapas, México, tuvo que ser reconstruida tras colapsar por el peso de la ceniza en la erupción de 1982 del volcán Chichón (Foto J.M. Marrero, 2009).....	187
Figura 104: Escenas del ejercicio de evacuación en el entorno del volcán Chichón, Chiapas, México. De izquierda a derecha y de arriba abajo: planificación del ejercicio en Tuxtla Gutiérrez; informe del Comité Científico en la Municipalidad de Chapultenango; recepción de la información sísmica en tiempo real mediante un teléfono móvil; presentación del escenario de caída de cenizas; Centro de Mando en la Municipalidad de Chapultenango; despliegue de operativo; tres imágenes del momento de la evacuación en Viejo Volcán; Centro de Acogida de evacuados; Preparación del Centro de Acogida; Puesto de control sanitario. (Fotos R. Ortiz y J.M. Marrero, 2009).....	190
Figura 105: Primer escenario para flujos piroclásticos, altura de colapso 300 metros. Simulación realizada para el ejercicio del volcán Chichón (México), enero 2009.	191
Figura 106: Segundo escenario para flujos piroclásticos, altura de colapso 400 metros. Simulación realizada para el ejercicio del volcán Chichón (México), enero 2009.	193
Figura 107: Tercer escenario para flujos piroclásticos, altura de colapso 500 metros. Simulación realizada para el ejercicio del volcán Chichón (México), enero 2009.	194
Figura 108: Escenario de caída de cenizas basado en el pronóstico de los vientos predominantes para el día 27/01/2009. Simulación realizada para el ejercicio del volcán Chichón (México).....	194
Figura 109: Escenario para flujos gravitacionales. Los materiales emitidos en la erupción de 1982 bloquearon el río Magdalena y formó una represa que al romperse generó un lahar que alcanzó la ciudad de Ostuacan (Macías et al., 2004). El modelo simula perfectamente ese trayecto. Simulación realizada en el volcán Chichón (México), en enero 2009.	194
Figura 110: Distribución de flujos y oleadas en la erupción de 1982 (Modificado de Scolamacchia y Macías (2005) en Macías, 2005).....	194
Figura 111: Esquema de simulaciones de evacuación para las localidades situadas en las proximidades del volcán Chichón, Chiapas, México. Se ha variado la capacidad de las vías para comparar los resultados obtenidos.	

La capacidad con valor 50 es igual para todos los puntos, minimiza cualquier atasco, situación acorde con el uso de transporte en convoy. En todos los puntos se mantiene la velocidad variable, en función del tipo de vía.....	199
Figura 112: Establecimiento del área de evacuación para el entorno del volcán Chichón, México, a partir de los escenarios máximos, buffer de 3.5 kilómetros para los flujos piroclásticos y 300 metros para los flujos gravitacionales.....	199
Figura 113.: Distribución Zonal 1. Esta distribución dirige a la población evacuada hacia la capital del estado, Tuxtla Gutiérrez, situada al sur del volcán Chichón, México. Los números de zona corresponden al valor del cruce de salida que poseen.....	200
Figura 114.: Esta distribución dirige a la población evacuada hacia los núcleos urbanos de Juárez, Teapa, Rincón Chamula, Chicoasén y Raudales Malpaso, en función de su proximidad. Todos están situados a más de 30 km del volcán. Los números de zona corresponden al valor del cruce de salida que poseen.	201
Figura 115: Representación gráfica del los escenarios 1 y 2, con variación en la capacidad de las vías de comunicación. Datos globales de llegadas al destino, personas preparados para evacuar, circulando, kilómetros de vías con circulación densa (atasco) y km de vías con retenciones (semáforo).....	202
Figura 116: Se ha aplicado la misma función de comportamiento de la población en todas las simulaciones.....	203
Figura 117: Tiempo de espera, condicionado por la saturación de las vías de comunicación.....	203
Figura 118: Evolución del número de personas en circulación por zonas.....	203
Figura 119: Evolución del número de kilómetros de vía con circulación lenta.....	203
Figura 120: Evolución del número de kilómetros bloqueados temporalmente debido a la densidad de la circulación.....	204
Figura 121.: Resultados para evacuaciones con tiempo medio de incorporación de 1:30 y 4 horas, para vías de comunicación con capacidad alta.....	205
Figura 122: Escenario 2, simulaciones con población situada en su localidad original y con la población, cuyos acceso a las localidad depende de veredas, desplazada a vías de comunicación de mayor entidad.....	210
123. Figura: Vista del volcán Popocatepetl (México), desde el Paso Cortés, zona norte (Foto R. Ortiz, 2005)...	214
Figura 124: Situación de los Estados de México, Morelos y Puebla y localización del volcán Popocatepetl, México.	215
Figura 125: Volcán Popocatepetl, México. Pequeña explosión con proyección de bombas que provocan numerosos incendios. Imagen tomada por las cámaras de vigilancia automática del CENAPRED el día 08/03/2007. (Foto CENAPRED, 2007).	218
Figura 126: Semáforo para el volcán Popocatepetl en uno de los peajes de la autopista México D.F. - Puebla. (Fotos J.M. Marrero 2002).....	218
Figura 127: Mapa de peligros del volcán Popocatepetl, México, desarrollado en las fases previas al inicio de la erupción de 1994 (Macías et al., 1995).....	222
Figura 128: Modelización mediante cono de energía de la zona afectada por flujos piroclásticos en el volcán Popocatepetl, México, utilizando un modelo modificado de Felpeto (2002, 2007). Altura del cono equivalente a 250 m. Obsérvese que el área obtenida coincide aproximadamente con el mapa de peligros. Parámetros: Centro emisión 539990.0, 2103083.0; Altura de colapso 250 m.....	223
Figura 129: Modelización de flujos gravitacionales para el volcán Popocatepetl, México, utilizando un método de Montecarlo modificado de Felpeto, 2002. El resultado obtenido refleja la ruta que seguirían los lahares y otro flujos con control topográfico. La morfología actual del cráter favorece la dirección norte, como ocurrió el 22/01/2000. Hay que tener presente que el modelo digital utilizado es anterior a 1982 y que la simulación se ha realizado en modo simplificado. Parámetros el modelo: Recorrido máximo (celdas) 10000; N° caminos/centro 10000; N° centros 27; Altura crítica 10.....	224
Figura 130: Una pequeña explosión en el cráter del volcán Popocatepetl genera un flujo piroclástico que se canaliza en la cañada nor-noreste del volcán y se detiene a sólo 2 km del pueblo Santiago Xalitlitzintla. Se muestra el corte del depósito en la zona terminal y un árbol quemado por la nube acompañante (Fotos, Cámara de vigilancia del CENAPRED (2000), CENAPRED (2001) y R. Ortiz (2002)).....	225
Figura 131: Señalización del punto de reunión para la evacuación en la plaza de Amecameca, Estado de México. (Foto: R. Ortiz)	227

Figura 132: Mapa de distribución de la población, red viaria y algunas infraestructuras en el entorno del volcán Popocatepetl, México. Los anillos poseen los siguientes radios 10, 30, 40, 80 y 100 kilómetros respectivamente.....228

ABSTRACT

Abstract

Volcanic crisis management is the most important problem that modern volcanology has. Areas affected by hazardous volcanic phenomena can be very extensive and populated. The alert phase can last a lot of time and the only solution is the preventive evacuation of the whole population. In order to facilitate impact scenarios' integration in Evacuation Plans, in this work an evacuation model has been developed to simulate massive evacuations. This software is integrated in some computer applications that are developed for the volcanic crises management by different european volcanological research groups. Its possibilities are shown simulating evacuations in Teide (Spain), Chichon and Popocatepetl (Mexico) volcanoes.

Emergency management is a responsibility of Civil Defense Authority. But if this is related to a volcanic phenomenon, the joint work of scientists and technical staff of the Civil Defense is needed. Emergency management by Civil Defense is based on the information facilitated by the scientific team on volcano's activity forecast and its awaited scenarios. Evacuations for volcanic threat can be extended for a long time so that they need a great quantity of economic and human resources. It is necessary to have updated specific Emergency Plans, in order to make them useful.

The ideas developed during this work proceed from hours of discussion between scientists and technical staff of Civil Defense and they are not written in any document of public access. This knowledge represents more than ten years of personal experience in management volcanic crises with the Volcanology Department of the National Museum of Natural Sciences and the Institute Jaime Almera, both related to CSIC, and Edafology and Geology Department of the University of La Laguna (ULL), in collaboration with other countries institutions dedicated to researching, monitoring and managing volcanic emergencies.

A review of current models for modeling massive evacuations has been done in order to extract and compare the elements that can be applied to the case of the evacuations in volcanic crisis. One of the most important elements during preventive evacuations is population behavior.

Information about population distribution and road network is needed by the /evacuation model/ to simulate the evacuation of a threatened region by a volcano. In addition, the software considers road network vulnerability in relation to ash fall, seismicity and flows. This information is obtained by applying to different methodologies that use a Geographical Information System (GIS). This system also integrates cartography and administrative population databases. This integration requires a great effort because most of the time, administrative databases have not been easily organized for georeference. Besides, in some other cases, cartography has been drawn only using CAD criteria. In order to apply the evacuation model, it is necessary to digitize a road network in point layers and join the total inhabitants number to each point. An important aspect of this development is the automatic

definition of crosses and mistakes detection. Population behavior is represented by means of distribution functions which are defined from the knowledge that authorities have of their population. The evacuation model has been programmed using the package BORLAND BUILDER 6. The basic functions have been coded in ANSI C to facilitate the migration to any platform (LINUX, MAC and WINDOWS).

The volcano Teide, Tenerife, Spain, is a stratovolcano with a complete series from basalt to phonolite magmas and the ability to produce explosive eruptions. At the north face of Teide volcano is located Icod de los Vinos municipality, with more than 20000 inhabitants. This municipality is exposed to the volcano activity, landslides, big floods, etc. That is the reason that justifies the application of the evacuation model using a large scale. The available information has allowed to work up to a building level, using a spatial discretization of 10 meters and a temporal discretization of 0.2 seconds. Depending on the evacuation scenario, the evacuation time obtained is between 2 and 20 hours, which demonstrates the importance of realizing a suitable planning of the evacuation. The evacuation model shows the presence of critical points in the road network. This result allows to recommend to the administration the improve of specific works to reduce the evacuation time.

The eruption of the Chichon volcano located in Chiapas State (Mexico, 1982) caused more than 2000 death. In order to evaluate the Emergency Plan, Civil Defense of Chiapas realized in January 2009 an exercise of evacuation of Viejo Volcan settlement. The simulation, using the evacuation model, considered 18000 inhabitants situated 3.5 km from the limit of maximum impact scenario. The used simulation parameters are 2 second for temporal discretization and 100 meters for spatial discretization. The inhabitants' association to the road network point layer is done up to a town level. The evacuation is simulated in a collective transport, so that the road capacity parameter is increased. The obtained evacuation times, from 8 to 13 hours, are slightly superior to any day trip.

The volcano Popocatepetl is in eruption from 1994 and Mexican authorities have had to evacuate repeatedly several thousands people. For this reason, this volcano has been chosen to evaluate the capacity of the evacuation model behavior, considering the evacuation produced on 19 December 2000, when 15000 persons were evacuated and remained evacuated more than 8 days. The parameters of the simulation are 1 second of temporal discretization and 50 meters for the spacial discretization. The inhabitants' association to the road network point layer is done up to a town level. The evacuation is simulated in a transport supplied by the Civil Defense, so that the road capacity parameter is increased. The evacuation time obtained (5 at 6 hours) are related to the actual duration of the real evacuation.

PRESENTACIÓN

Presentación

La gestión de la crisis volcánica es el mayor problema con el que se enfrenta la volcanología actual. En algunos fenómenos naturales, como los terremotos, la actuación se realiza con posterioridad al impacto, en otros, como huracanes, inundaciones, fuertes vientos o nevadas, la actuación se realiza durante el impacto o con pocas horas de anticipación. En el caso de las crisis volcánicas, la fase de alerta previa puede prolongarse durante mucho tiempo y la zona de impacto puede afectar un área muy extensa y, en ocasiones densamente poblada, cuya única respuesta es, en muchos casos, la evacuación total de la población.

Esta es la razón por la que, estadísticamente, son pocas las víctimas en las erupciones volcánicas frente a las producidas por otros fenómenos naturales. Sin embargo, cuando no se actúa correctamente se producen miles de muertos (Mont Pelé 1902, Nevado del Ruiz 1985, etc...) debido, en gran medida, a la mala gestión por parte de las autoridades responsables.

Aunque, aparentemente, la gestión de la emergencia debe de ser responsabilidad de las Protecciones Civiles, las especiales características del fenómeno volcánico hace necesario el trabajo conjunto entre los científicos y los técnicos de la Protección Civil, especialmente en las cuestiones relacionadas con la planificación de la emergencia, que incluye la toma de decisiones en función de la evolución previsible de la actividad del volcán y de los escenarios esperados y, en consecuencia, establecer el plan de evacuación acorde con los medios e infraestructuras disponibles y en función del impacto previsto.

Las erupciones volcánicas suelen estar precedidas por actividades precursoras observables, siendo las más evidentes el aumento de sismicidad, deformación del terreno, emisión de gases, etc., causadas, en términos generales, por el ascenso del magma o por cambios en las condiciones de las cámaras magmáticas corticales. No siempre esta actividad precursora se presenta de manera clara y fácilmente identificable y, la búsqueda e interpretación de precursores, sigue siendo un tema importante de investigación actual para la correcta gestión del riesgo volcánico.

Desde tiempos remotos, ha habido casos evidentes de la existencia de señales previas a una erupción, de ahí que se hayan producido evacuaciones como las ocurridas en la Caldera de Thera, hacia el año 1625 A.C. en la isla de Santorini (Grecia) o en el año 79 D.C. en el área del volcán Vesubio (Italia). Dado el elevado número de personas residentes en estos lugares, la toma de decisión de la evacuación debió implicar un alto nivel organizativo y, especialmente, de percepción del fenómeno.

La gran complejidad de las actuales sociedades desarrolladas y su crecimiento con la ocupación intensiva de grandes extensiones de terreno, ha incrementado considerablemente el riesgo volcánico así como el de otros fenómenos naturales. A esto, hay que añadir la dificultad de tomar decisiones para llevar a cabo evacuaciones preventivas en base a la interpretación de

unas señales precursoras, no siempre evidentes para el conjunto de la población y, difícilmente asumibles por las autoridades. Además, estas evacuaciones implican movilizar a un gran número de personas, requiriendo gran cantidad de recursos económicos y humanos, en una situación que puede prolongarse durante mucho tiempo. La complejidad de esta actuación, obliga a disponer de Planes de Emergencia específicos, que deben entrar en el detalle de la operación y continuamente actualizados para que ser útiles. La gestión integrada de una crisis volcánica implica seguir la actividad del volcán, establecer pronósticos de evolución y generar escenarios. En base a estos últimos, se debe actualizar el Plan de Emergencia y preparar la evacuación preventiva de la zona de impacto.

Muchas de las ideas aquí recogidas son el fruto de horas de discusión entre científicos y técnicos de la Protección Civil que no están reflejadas en documentos de acceso público. Representan más de diez años de experiencia en gestión de crisis volcánicas, reales y simuladas conjuntamente con el Departamento de Volcanología del Museo Nacional de Ciencias Naturales, el Instituto Jaime Almera, ambos del Consejo Superior de Investigaciones Científicas y el Departamento de Edafología y Geología de la Universidad de La Laguna, en colaboración con instituciones dedicadas a la investigación, vigilancia y manejo de emergencias volcánicas de otros países con volcanismo activo con las que se mantiene intercambio académico. Es por ello que, personalmente, he tenido la oportunidad de participar en estas investigaciones y trabajos de campo lo que me ha permitido afrontar el desarrollo de esta memoria. Por otra parte, mi formación inicial de geógrafo junta a los estudios en volcanismo activo, se ha visto complementada con la experiencia laboral desarrollada en el ámbito de la informática profesional en los últimos años.

En este trabajo, se desarrolla una metodología para la planificación de evacuaciones en caso de una crisis volcánica. Esto, permite al operador, para un escenario de impacto previsto de la erupción esperada, evaluar distintas opciones de evacuación para la zona afectada, considerando el comportamiento de la población, los medios disponibles y la ocurrencia de otros fenómenos que puedan modificar las condiciones de las vías de comunicación. Esta herramienta está integrada en un conjunto de aplicaciones informáticas que se están desarrollando, de forma coordinada, por distintos grupos europeos de investigación volcanológica para gestiones de crisis volcánicas. Los tres pilares que soportan la metodología son: la cartografía digital y las bases de datos disponibles, el Sistema de Información Geográfica en el que se integran y el motor de evacuación que se ha desarrollado específicamente en C++.

La presente memoria está estructurada en cuatro partes. La primera está dedicada a presentar la problemática de la gestión de la crisis volcánica, con especial atención al tema de las evacuaciones y una revisión de las soluciones existentes.

La segunda parte desarrolla la metodología utilizada y los diversos problemas encontrados. Está dividida en dos grandes bloques; el primero centrado en la obtención y preparación de datos procedentes de diversas fuentes no siempre compatibles. El segundo está dedicado a la descripción del motor de evacuación desarrollado, exponiendo los elementos fundamentales

que lo componen y su implementación en C++. Finalmente, se muestra su integración en el Sistema de Información Geográfica (*SIG*).

La tercera parte está dedicada a presentar la aplicación de esta metodología en tres volcanes, Chichón, Popocatépetl y Teide, con distinto nivel de actividad y considerados de alto riesgo que presentan características socio-económicas, entornos y formas de vida diferentes.

El volcán Teide (España), situado en la isla de Tenerife, Islas Canarias, es actualmente objeto de numerosas investigaciones, dirigidas a definir su estado ante la posibilidad de que entre en erupción en un espacio de tiempo geológico relativamente corto, tras la crisis sismo-volcánica detectada en 2004 (García et al., 2006 Martí et al., 2009). La zona más vulnerable a la actividad del volcán está situada en el flanco norte de la isla y engloba varios municipios. Se ha elegido el municipio de Icod de los Vinos como ejemplo para la aplicación de esta metodología, zona de la que se dispone de datos muy detallados pero que carece de experiencia en gestión de crisis volcánicas.

El volcán Chichón (México), situado en el estado de Chiapas, es conocido por su erupción en 1982, que provocó miles de muertos derivados de un problema de gestión (De la Cruz-Reyna, 2002, Macías, 2005). Se localiza en una zona de selva muy antropizada, con pequeñas poblaciones indígenas aisladas, un nivel socio-económico muy bajo y una red de comunicaciones muy vulnerable. En 2007 se preparó el Plan de Emergencia para las dos áreas volcánicas activas del Estado de Chiapas (volcanes Chichón y Tacaná). En enero de 2008, este Plan de Emergencia ha sido evaluado mediante la realización de un simulacro de evacuación en el área del volcán Chichón. La participación en este ejercicio como miembro del Comité Científico Asesor nos ha permitido la incorporación de estos datos a la memoria y la valoración de la metodología propuesta.

El volcán Popocatépetl (México), próximo a las ciudades de México D.F. y Puebla que afecta directamente a tres estados: México, Morelos y Puebla, inició un periodo eruptivo en 1993 en el que todavía esta inmerso (Delgado-Granados et al., 2008). La zona de impacto puede afectar tanto a pequeñas poblaciones como a grandes ciudades e infraestructuras tan importantes como aeropuertos y líneas vitales de suministro, electricidad y saneamiento. En estos años, se han realizado numerosas evacuaciones en la zona que han afectado a más de 30.000 personas. Cuenta con Planes de Emergencia y rutas de evacuaciones preestablecidas, que han permitido calibrar la opción del modelo de evacuación propuesto en este trabajo.

La cuarta parte, corresponde a la elaboración de una serie de recomendaciones dirigidas a los responsables de las bases de datos administrativas, de las cartografías digitales y, en general, a los organismos que manejan todos aquellos datos que, en una situación de crisis, pueden resultar necesarios para su incorporación a un Sistema de Información Geográfica, para la evaluación del riesgo y para la adopción de medidas de mitigación. Estas recomendaciones se basan, en gran medida, en las dificultades encontradas en el tratamiento y preparación de los datos para su posterior utilización del modelo de evacuación en la gestión de una crisis real.

Finalmente, se presentan las conclusiones de este trabajo. A lo largo del texto, se han incluido numerosas ilustraciones para facilitar la percepción de la problemática de una evacuación masiva por la amenaza de un volcán.

CAPITULO 1

Introducción, gestión de crisis y modelos de evacuación

1 Introducción, gestión de crisis y modelos de evacuación

1.1 Introducción

A partir de los años noventa ha ido cobrando importancia la *gestión de emergencias* y, sobre todo, las políticas de mitigación de riesgos, en un intento por reducir el impacto que ocasionan los fenómenos naturales. Sin embargo, el crecimiento constante de la población, ocupando zonas más extensas, con una estructura socio-económica cada vez más vulnerable, hace que la efectividad de estas medidas no siempre sea la deseada, además, obliga al desarrollo de políticas y herramientas de gestión cada vez más complejas. La elaboración de un modelo de evacuación, especializado y adaptado al fenómeno volcánico, debe entenderse como una parte más de una serie de elementos que facilitan dicha gestión.

1.1.1 Gestión de Crisis Volcánicas

La gestión de crisis volcánicas, tal como se entiende hoy en día, comienza su andadura a principios de los años ochenta, periodo en el que se han perfeccionado y desarrollado nuevas herramientas para facilitar esta labor. Muchos de los problemas que se producen durante el desarrollo de una crisis volcánica estaban bien definidos (Tomblin, 1982), especialmente aquéllos que hacen referencia al papel que juegan los científicos, las autoridades y los medios de comunicación. Las directrices y estrategias adoptadas por cualquier población para reducir y mitigar su exposición y vulnerabilidad ante un fenómeno natural, se deben considerar integrados en la *gestión unificada de fenómenos naturales*. En este sentido, la Década Internacional para la Mitigación de los Desastres Naturales, 1990-2000 (resolución 44-236 1987) promueve comprender cómo un fenómeno natural se transforma en un desastre.

La participación en el seguimiento de las crisis ocurridas en los volcanes Villarrica (Chile, 2000), Llaima (Chile, 2008), Tungurahua (Ecuador, 2002 y 2003) y Popocatépetl (México, activo desde 1994), entre otros, nos ha conducido a distinguir dos fases que facilitan la gestión de la crisis volcánica y que denominamos *fase continua* y *fase de crisis*. La primera se corresponde con la actuación rutinaria y se prolonga en el tiempo, englobando diversas labores como son: educación, elaboración y actualización de Planes de Emergencia, Ordenación del Territorio, diseño, puesta en marcha y mantenimiento de la Red de Vigilancia Básica y observación y análisis de los datos recogidos; todo ello a partir del conocimiento del sistema volcánico y de las características socio-económicas de la población que vive en su entorno. La *fase de crisis* se pone en marcha cuando el sistema volcánico muestra una probabilidad alta de que ocurra una erupción y es necesario dar una respuesta eficiente que reduzca considerablemente el impacto final de este fenómeno natural. Hay que tener presente que el conocimiento actual del pronóstico de erupciones obliga a considerar una probabilidad alta cuando alcanzamos valores entre 1% y 10% (Woo, 2008).

Modelo de evacuación de escala variable. Una herramienta para la gestión de Crisis Volcánicas

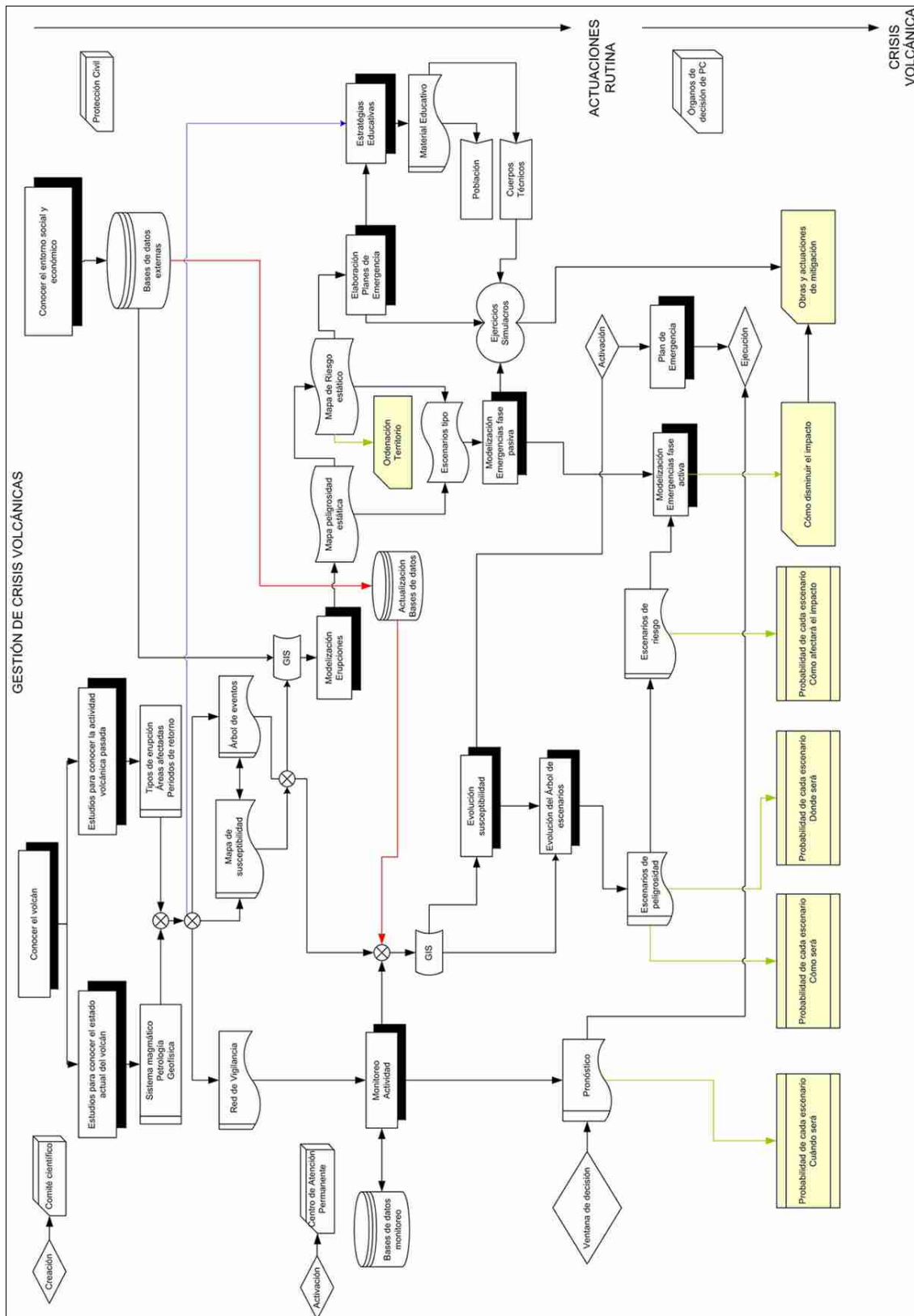


Figura 1: Organigrama para la Gestión de una Crisis Volcánica



Figura 2: Inicio de la erupción del volcán Llaima, 1 enero de 2008 (Foto: Observatorio Volcanológico de los Andes del Sur, Chile, 2008)

Como comentamos anteriormente, no aceptamos la calificación de Desastres Naturales tal como se usa habitualmente, es decir, como una acción llevada a cabo única y exclusivamente por la naturaleza, donde la población recibe un fuerte impacto por un fenómeno natural que ha excedido una escala determinada de intensidad. El análisis de las últimas crisis volcánicas, ha puesto de manifiesto que no existe una relación directa entre desastre y magnitud del fenómeno (De la Cruz-Reyna y Tilling, 2008). Los mayores desastres han ocurrido con erupciones de moderada o pequeña magnitud con un Índice de Explosividad Volcánica (*Volcanic Explosive Index, VEI*, Newhall y Self, 1982) entre 2 y 3, confirmando que, independientemente de la intensidad del fenómeno natural, es la gestión de la crisis la que conducirá a reducir este impacto o a provocar una catástrofe. Por ello, es difícilmente aceptable de calificación de Desastre Natural; no existen desastres naturales si no mala gestión de los fenómenos naturales. Este posicionamiento es crucial en la *fase continua* de la gestión pues, en ella, se construyen y definen las bases sobre las que se asienta la actuación en la *fase de crisis*. El esfuerzo necesario para llevar a buen término esta actuación y su eficacia estará en función de las medidas adoptadas a lo largo del tiempo, en los periodos en los que el sistema volcánico está en un estado en el que no presenta un peligro inmediato.

Tabla 1: Índice de Explosividad Volcánica (Simkin and Siebert, 1994)

VEI	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Descripción	No explosiva	Pequeña	Moderada	Moderada a grande	Grande	Muy Grande	--	--	--
Volumen emitido (m ³)	< 10,000	10,000-1,000,000	Uno a diez millones	Diez a cien millones	Cien a mil millones	Uno a diez km ³	Diez a cien km ³	Cien a mil km ³	Más de 1000 km ³
Altura de la columna (km)	0,1	0,1 - 1	1 - 5	3 - 15	10 - 25	Más de 25	--	--	--
Duración en horas	<1	<1	1 - 6	1 - 6	1 - 12	6 - 12	Más de 12	--	--
Inyección a la troposfera	mínima	leve	moderada	sustancial	Grande	--	--	--	--
Inyección a la estratosfera	nula	nula	nula	posible	definida	significativa	grande	--	--

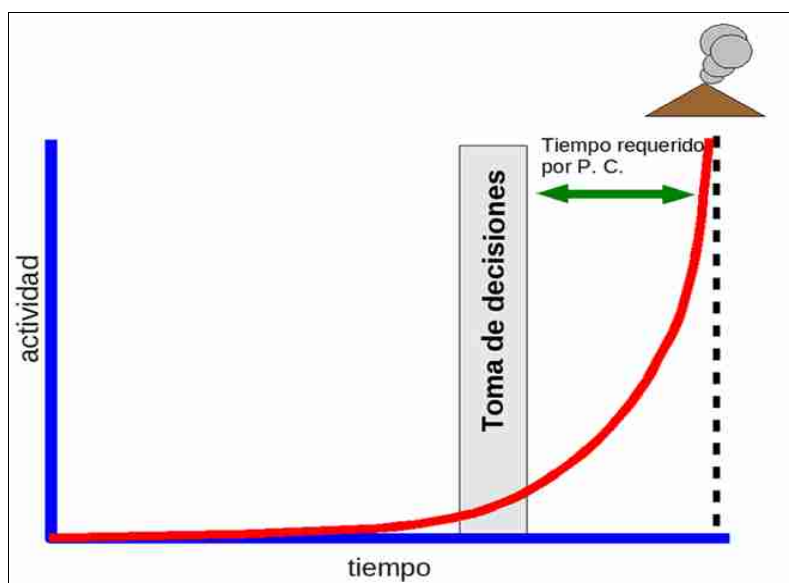


Figura 3.: Actualmente, el único método cuantitativo para el pronóstico de erupciones está basado en el fallo del material (FFM, Voight, 1988). Según este modelo, los observables ligados a la actividad volcánica se aceleran poco antes de la erupción, siguiendo una hipérbola. A efectos prácticos, se representa el inverso de la variación del observable, con lo que se obtiene una recta que corta al eje de tiempos en el momento esperado de la erupción.

1.1.1.1 Fase de gestión continua del fenómeno volcánico

Esta fase es fundamental y crucial para la gestión de los fenómenos naturales que pueden llegar a causar graves daños sobre las poblaciones expuestas. Sin embargo, para que se ponga en marcha, es necesario que la población y las autoridades sean conscientes de los peligros derivados del entorno natural en el que viven, especialmente si los periodos de retorno son lo suficientemente largos como para borrar de la memoria colectiva los eventos ocurridos en tiempos pasados (Coburn et al., 1991).

A nivel científico, es fundamental conocer el volcán, lo que hizo en el pasado y su estado actual. A partir de esta información podemos empezar a definir las siguientes herramientas:

- red de vigilancia
- árbol de eventos
- mapas de susceptibilidad.

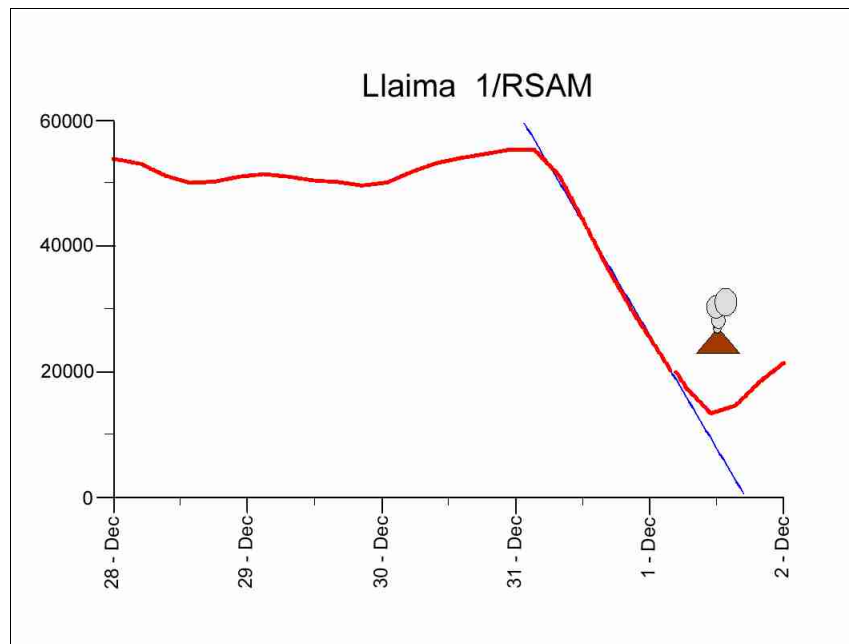


Figura 4.: Pronóstico del inicio de la erupción del volcán Llaima en enero de 2008, realizado en el Departamento de Volcanología del CSIC mediante el método del FFM, utilizando la evolución del inverso de la energía sísmica liberada (RSAM). Obsérvese que el pronóstico de la erupción sólo es evidente 12 horas antes.

Mediante estas dos últimas y el desarrollo de simuladores para los diferentes peligros generados por un volcán, se elaboran y modelan erupciones. A partir de estos modelos se obtienen los mapas de peligros que, añadiéndoles los datos de infraestructuras y población, nos determinarán el riesgo de cualquier zona. Esta línea de actuación establece las bases para la adecuada Ordenación del Territorio, diseño de estrategias educativas y Planes de Emergencia. A medida que se mejora en el conocimiento del volcán, se deben tener previstos los canales convenientes para que se produzca una actualización constante de la información

necesaria para una correcta gestión de la crisis. Estas líneas de actuación continua definen las bases fundamentales sobre las que se asientan las actuaciones futuras en la *fase de crisis*.

1.1.1.2 Red de vigilancia

Como cualquier fenómeno natural complejo objeto de estudio, el diseño de la red de vigilancia debe hacerse siempre desde una óptica multidisciplinar, adaptada al conocimiento que tenemos del volcán. Sin embargo, la red sísmica es el sistema de vigilancia más extendido debido al bajo coste de implantación y operación y a la gran experiencia que se tiene, pues fue el primero en desarrollarse y a fines del siglo XVIII ya estaba operativo en el Vesubio. Por este motivo, actualmente sólo existen referencias de alertas basadas en la actividad sísmica, las otras técnicas de vigilancia se encuentran todavía en desarrollo o que el volcán se encuentre en un estado muy avanzado de actividad (Scarpa y Tilling, 1996, Spark, 2003).

El diseño de una buena red no tiene por que implicar su operatividad al 100% en todo momento, ya que cuando el volcán esta en calma, *fase continua*, puede funcionar con una estructura simplificada que permita una vigilancia efectiva a un coste reducido. Cuando el sistema se reactiva, *fase de crisis*, es cuando se procede a incrementar la instrumentación en función del diseño inicial, siempre que las condiciones del volcán lo permita. La red de

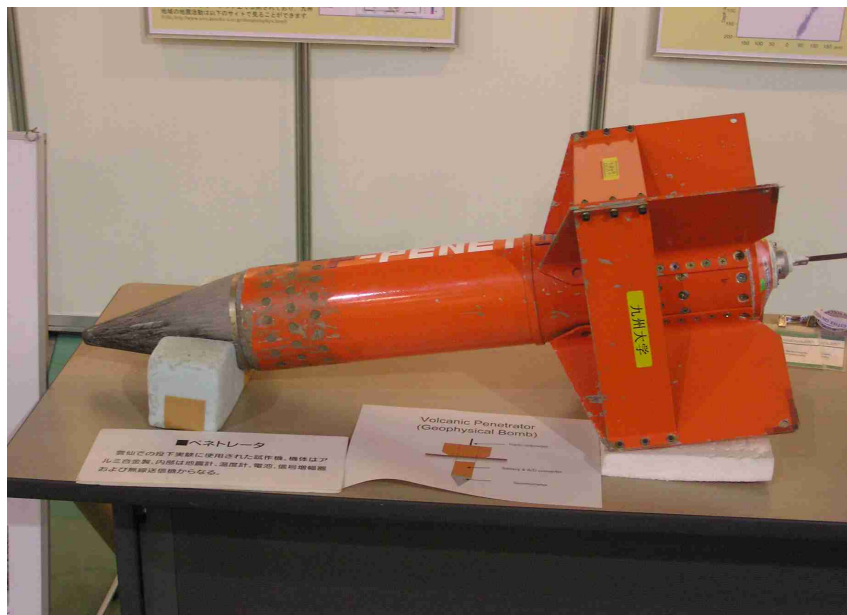


Figura 5.: Cuando el acceso al volcán es muy peligroso se han ideado métodos para desplegar la instrumentación complementaria sin exponer a los técnicos. La imagen muestra una estación sísmica contenida en un proyectil que se lanza desde un helicóptero (Foto J.M. Marrero, 2007)

vigilancia debe estar constantemente apoyada por proyectos y campañas de investigación; mediante los que se llevarán a cabo trabajos más detallados sobre determinados parámetros para ampliar los conocimientos sobre el volcán o sistema volcánico objeto de estudio (Ortiz et al., 2001).

1.1.1.3 Árbol de eventos

El árbol de eventos es una herramienta desarrollada recientemente, en la que se definen todos los tipos de erupciones y fenómenos asociados que se pueden producir en el sistema volcánico sobre el que se aplica y la probabilidad de que se presenten (Newhall y Hoblitt, 2002). Como es lógico, depende del conocimiento que se tenga del volcán, de las erupciones pasadas que se obtiene mediante un buen análisis de la estratigrafía y cronología, especialmente en los últimos 100.000 años y de los datos que proporciona la red de vigilancia. Las estimaciones a largo, medio y corto plazo que se establecen en el árbol de eventos están muy relacionadas con la disponibilidad y precisión de la reconstrucción de las erupciones pasadas y su geocronología. Cuanto más retrocedemos en el tiempo, menor es la resolución obtenida, debido a la precisión de las técnicas de datación y a la identificación y reconstrucción de los depósitos de las erupciones muy antiguas, en los que difícilmente pueden identificarse eventos de menor magnitud. Una muestra de este problema puede observarse analizando el catálogo mundial de erupciones (Simkin and Siebert, 1994). Igualmente, según el tipo de sistema volcánico estudiado, este árbol puede ser más sencillo o más complejo, pero es fundamental para diseñar los posibles escenarios, a partir de las simulaciones de los distintos fenómenos e identificar las características de los precursores asociados a cada rama. La complejidad del árbol de eventos condiciona la elaboración de los Planes de Emergencia, ya que debe tener en cuenta todos los posibles eventos.

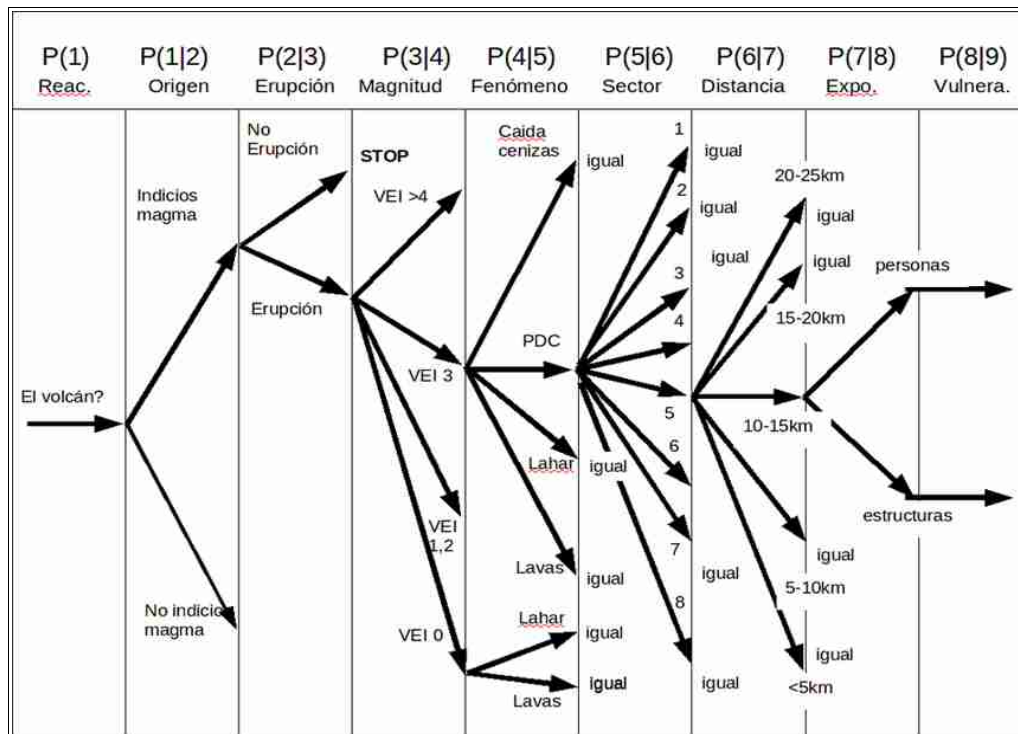


Figura 6.: Árbol de eventos adaptado para la automatización de la gestión de la emergencia (modificado de Newhall y Hoblitt, 2002)

1.1.1.4 Mapa de susceptibilidad

En todas las áreas volcánicas activas puede surgir un volcán en cualquier punto aunque, en muchos sitios, la actividad se concentra en pequeñas zonas o próxima a un gran aparato volcánico o a un volcán con actividad persistente. En teoría, cualquier punto de la superficie es susceptible de convertirse en un centro emisor, por ello, se ha introducido el concepto de mapa de *susceptibilidad volcánica*. Su objetivo es asignar la probabilidad de que ocurra una erupción en un punto y en un intervalo de tiempo concreto (Jaquet et al, 2008). En la elaboración del mapa de susceptibilidad que tiene un carácter estático, se incorporan los datos estructurales, geológicos y geofísicos, junto con la distribución de centros de emisión anteriores. Esta información debe tenerse en cuenta en la Ordenación del Territorio.

Cuando se produce una reactivación del sistema volcánico, el carácter de la susceptibilidad cambia, se añaden los datos procedentes de la red de vigilancia, que nos permitirá acotar las zonas con más probabilidades de ocurrencia de erupción y las características de la misma en

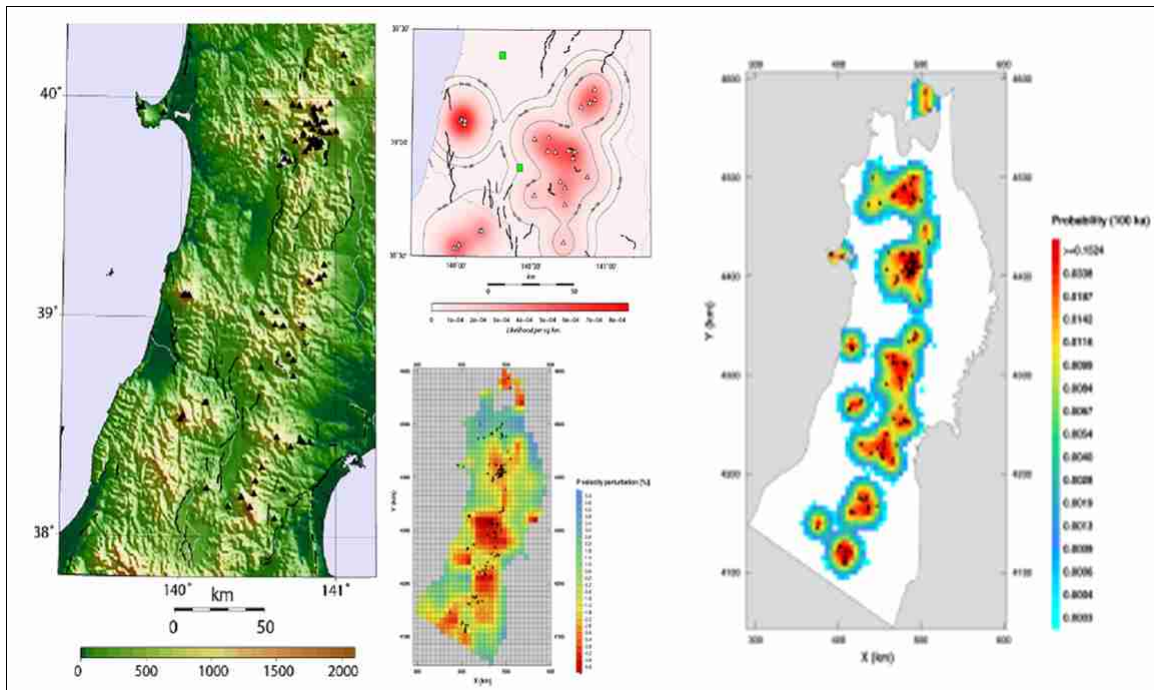


Figura 7: Ejemplo de elaboración de un mapa de susceptibilidad para los volcanes del área central de Japón (Jaquet et al, 2008)

función de la distribución y tipología de las señales registradas. A partir de esta información, consideramos la evolución de los Árboles de Escenarios y, en consecuencia, de los Planes de Emergencia.

1.1.1.5 Modelización de erupciones

La modelización de erupciones necesita el desarrollo de herramientas de simulación. Su uso en la *fase continua* de la gestión permite la generación de los Mapas de Peligros cuya

superposición con las infraestructuras y el poblamiento permite obtener los Mapas de Riesgo (Felpeto, 2002). Esta información es usada, por un lado, para la Ordenación del Territorio; por otro, para la elaboración de Planes de Emergencia y, en consecuencia, para desarrollar toda la información educativa orientada a la autoprotección y saber cómo actuar en caso de erupción.

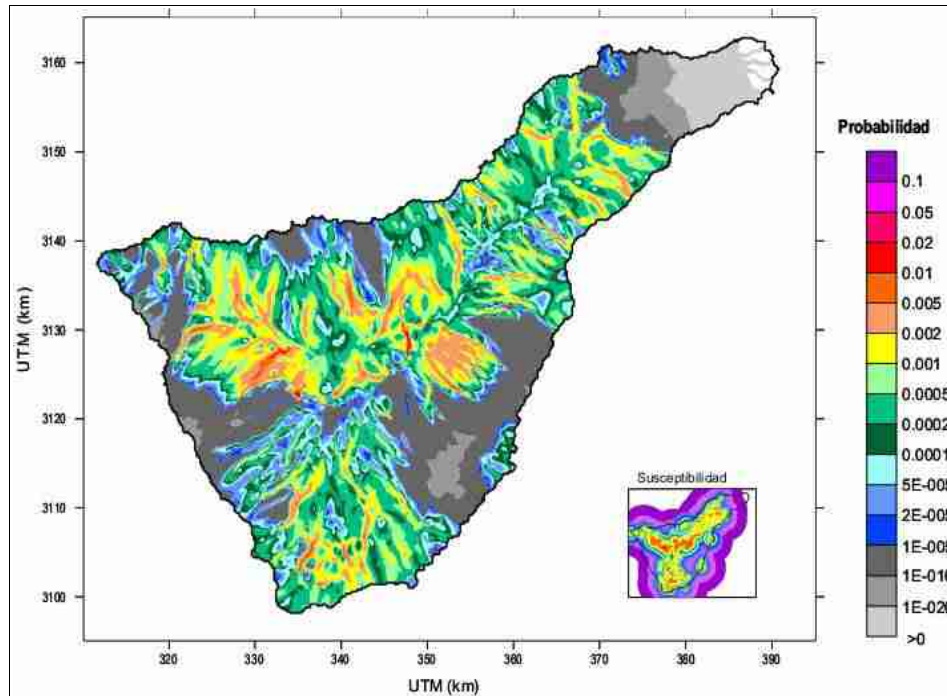


Figura 8: Mapa de peligrosidad por flujos de lava para la isla de Tenerife. Establecido considerando que la probabilidad de apertura de un nuevo centro es proporcional al número de conos recientes. Se calculan todas las posibles trayectorias que puedan tomar los flujos de lava (Felpeto, 2002).

1.1.1.6 Planes de Emergencia

El diseño de los Planes de Emergencia debe de estar basado en el conocimiento del sistema volcánico y, sobre todo, en los daños que puede llegar a ocasionar a la población (UNDRO & UNESCO, 1985). Por tanto, obligatoriamente siempre se deben tener en cuenta todos los escenarios posibles y en su grado máximo. Es importante que las personas involucradas en su elaboración y ejecución estén formadas para dar una respuesta efectiva, siendo necesaria la cooperación entre instituciones, especialmente con los estamentos científicos. Otro aspecto fundamental es la necesidad de que estos planes sean conocidos por la población que es, en definitiva, a quien van destinados. Los Planes de Emergencia, además de otros elementos, deben disponer de las herramientas necesarias que le permitan adecuarse a los escenarios y escalas de tiempo para las evacuaciones previstas durante el desarrollo de la crisis volcánica.



Figura 9: Reunión del equipo científico del Instituto Geofísico y la Protección Civil de Ecuador con los representantes sociales de las poblaciones afectadas por el Volcán Tungurahua 2003. Estas reuniones forman parte de la estrategia educativa para la difusión del Plan de Emergencia (Foto R. Ortiz).

1.1.1.7 Estrategias Educativas

La educación, en su sentido más amplio, siempre es fundamental en todos los aspectos de nuestra vida pero, sobre todo, cobra especial importancia en aquéllos que afectan directamente a nuestra seguridad. El desarrollo de las Estrategias Educativas está basado en dos líneas de investigación principales: el conocimiento del volcán y el entendimiento de lo que puede hacer. A partir de esto, se adaptarán y difundirán a niveles básicos los conocimientos científicos y las medidas de autoprotección que hay que tomar cuando, en una *fase de crisis*, se deban aplicar los Planes de Emergencia. La educación de la población es la base fundamental para reducir el impacto que pueda producir cualquier fenómeno natural. Una población que no esté educada incrementa notablemente el riesgo al que está expuesta, además de dificultar la gestión en la *fase de crisis*, que es precisamente la más crítica. Tanto en la modelización de las erupciones, concretamente para la evaluación del riesgo, como en el diseño de los Planes de Emergencia, debe tenerse en cuenta que las características socio-económicas de la población y de las infraestructuras expuestas están en constante evolución, lo que obliga a que los Planes de Emergencia se deban actualizar periódicamente al igual que los programas educativos asociados.

Con motivo de la crisis registrada en Tenerife en 2004 (Martí et al., 2009) la Escuela Nacional de Protección Civil (España) publica la Guía Didáctica para Riesgo Volcánico,

orientada al profesorado de Enseñanza Obligatoria en regiones volcánicas activas (Llinares et al., 2004). En esta guía se presentan los conocimientos básicos sobre la actividad volcánica y se enfatizan las actuaciones durante una crisis volcánica y las medidas de autoprotección que deben adoptarse.

1.1.1.8 Transición en la gestión, de la fase continua a la fase de crisis.

Todo lo expuesto en la *fase continua* de la gestión: el conocimiento del volcán y los peligros asociados, el diseño de los Planes de Emergencia, la correcta Ordenación del Territorio, un buen sistema de vigilancia, modelización y pronóstico junto a unos Cuerpos de Emergencia formados y una población educada, constituyen las bases fundamentales sobre las que se asienta el éxito de la gestión del fenómeno volcánico.

Finalmente, debemos tener en cuenta que el paso de la *fase continua* a la *fase de crisis* no es siempre progresivo, dada la irregularidad de la actividad volcánica en nuestra escala de tiempo. En muchos casos, la identificación de *fase de crisis* sólo es posible unos pocos días antes de la erupción, incluso en erupciones explosivas con VEI significativo (>3), aunque es posible que el volcán lleve años mostrando signos de actividad por encima del nivel de base e incrementándose muy lentamente.

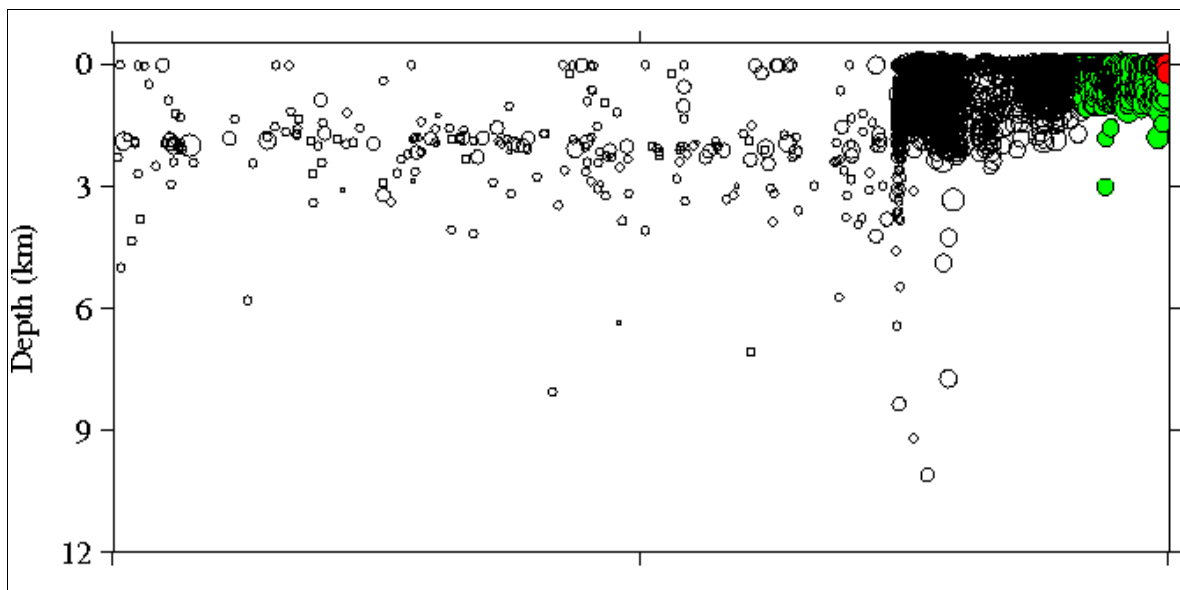


Figura 10.: Evolución de la actividad sísmica en el volcán St. Helens antes de la erupción de 2004. Obsérvese que la actividad del volcán se limita a mostrar sismicidad superficial hasta pocas horas antes del inicio de la erupción (USGS, 2004).

Los volcanes con erupciones violentas, pueden presentar reactivaciones periódicas y vuelta a la normalidad durante largos periodos de tiempo, pero si el sistema de gestión está consolidado, este hecho no tiene por que representar un problema.

1.1.2 Fase de crisis en la gestión de crisis volcánicas

Entendemos por *fase de crisis* aquella en la que se aborda la gestión del fenómeno volcánico de forma inmediata, ante la posibilidad de que ocurra una erupción en un corto intervalo de tiempo, actualizando todos los mecanismos diseñados con anterioridad. Cuando la red de vigilancia detecta alguna variación en los datos que recibe habitualmente, lo primero que se hace es verificar si hay algún defecto en los instrumentos. Una vez comprobado que el instrumental funciona correctamente, se pasa a una nueva situación donde se especula con un posible cambio en el sistema volcánico que, en la mayoría de los casos, indica el inicio de una *fase de crisis*, aunque no implica necesariamente una erupción inmediata (Ortiz, 1996).

Se inicia así la *fase de crisis* que requiere un nivel más crítico y delicado en la gestión. En primer lugar, debe potenciarse la red de vigilancia y poner en marcha nuevas campañas de investigación puntuales que permitan obtener nuevos datos y cotejarlos con los disponibles de campañas anteriores. El objetivo científico es verificar qué cambios ha sufrido el sistema volcánico para estimar cuando se producirá la erupción, cómo será, donde y cómo nos afectará para, conjuntamente con Protección Civil, iniciar la revisión de los Planes de Emergencia, actualizando la información socio-económica y medios disponibles.

Este proceso está dirigido a la mitigación del riesgo volcánico ante una posible erupción y la recuperación de la zona tras el impacto. Debe tenerse en cuenta que, en muchas ocasiones, esta situación se prolonga durante años, dificultando la gestión de crisis notablemente debido a la tendencia que tiene a politizarse y degradarse, sobre todo, si la *fase continua* de gestión no se ha ejecutado correctamente, especialmente en lo concerniente a la educación de la población.

1.1.2.1 Valoración de opiniones, elicitación

Uno de los problemas que se presentan en las discusiones de cualquier comité de expertos, es la disparidad de conocimientos y la presencia de miembros que desean imponer sus opiniones sobre el resto. Dado el carácter excepcional de la crisis volcánica, esta situación llega a extremos insospechados (Grazia, 1976, Tomblin, 1982) porque, muchas veces, quien preside el comité suele pertenecer al estamento político y carece de los conocimientos necesarios para poder dirigir las discusiones. En estos últimos años, para resolver situaciones parecidas en otros ámbitos, se han propuesto métodos para obtener una opinión consensuada del grupo de expertos (Cooke y Goossens, 2000) que han conducido al desarrollo de herramientas informáticas (Cook y Solomatine, 1992), para realizar este proceso de forma automática y lo más objetivamente posible. La elicitación se ha utilizado para establecer el pronóstico de evolución de la erupción del volcán Soufrière Hills en Montserrat (Sparks y Aspinall, 2004). Hay que señalar que cuando se alcanza una estructura organizativa que ofrece garantías en su análisis y recomendaciones, la elicitación puede pasar a un segundo plano o sencillamente no ser necesaria.

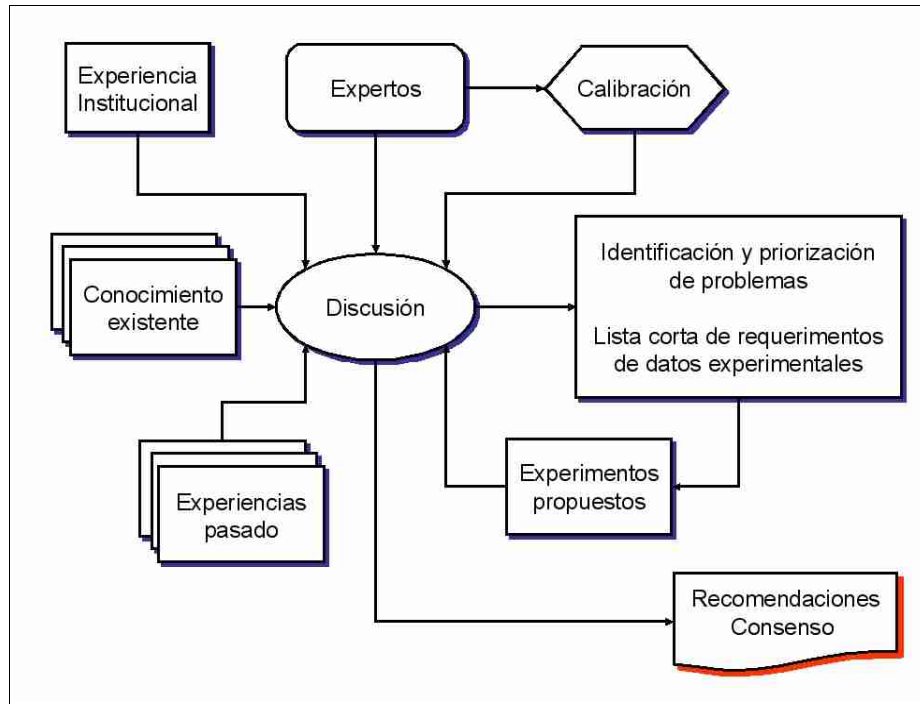


Figura 11: Proceso de elicitación destinado a obtener opiniones consensuadas en Comités Científicos con graves divergencia de opiniones.

1.1.2.2 Red de vigilancia

En esta *fase de crisis*, la función principal de la red de vigilancia es proporcionar la información necesaria para conocer cómo evoluciona la actividad volcánica, con el objetivo de determinar cuando, dónde y cómo será la erupción. Es fundamental que esta red esté bien diseñada y adaptada a las características del sistema volcánico que se vigila, pues de ella dependen todos los demás aspectos de la gestión. Hay que tener en cuenta que, a partir de este momento, se opera en tiempo real y que los tiempos de respuesta son fundamentales dentro de la cadena de gestión. Es responsabilidad del sistema de vigilancia establecer los pronósticos de evolución de la crisis, asignando probabilidades y tiempos.

La valoración de precursores de una erupción ha avanzado mucho en los últimos años, debido al establecimiento de modelos teóricos de la física del inicio de una erupción, como es el Modelo de Fallo del Material (*FFM*) (Voight, 1988, De la Cruz-Reyna y Reyes-Dávila, 2001, Ortiz et al., 2003) y las técnicas de análisis de series temporales (Tarraga et al., 2006). Para su aplicación es necesario disponer de registro continuo de todos los datos de la red de vigilancia. Los datos obtenidos en campañas esporádicas, en general, no cumplen la leyes del muestreo por lo que deberán analizarse con sumo cuidado y generar una serie temporal sintética a partir de ellos. Una vez establecida la serie temporal existen diversos paquetes informáticos de análisis; uno de los más completos y de fácil manejo es R, disponible para las

tres plataformas principales (Linux, Mac y Windows) (R, 2008). Otro paquete ampliamente utilizado para el análisis de señales es el SCILAB (Carniel et al., 2006). La valoración de toda la información disponible es un proceso complejo pues, junto a datos de gran calidad, entre ellos la información sísmica, hay que valorar otros que son meramente cualitativos, como por ejemplo la percepción de los habitantes. Para llevar a cabo esta función se utilizan herramientas de tipo bayesiano (Kadie et al., 2001, Aspinall et al., 2003)

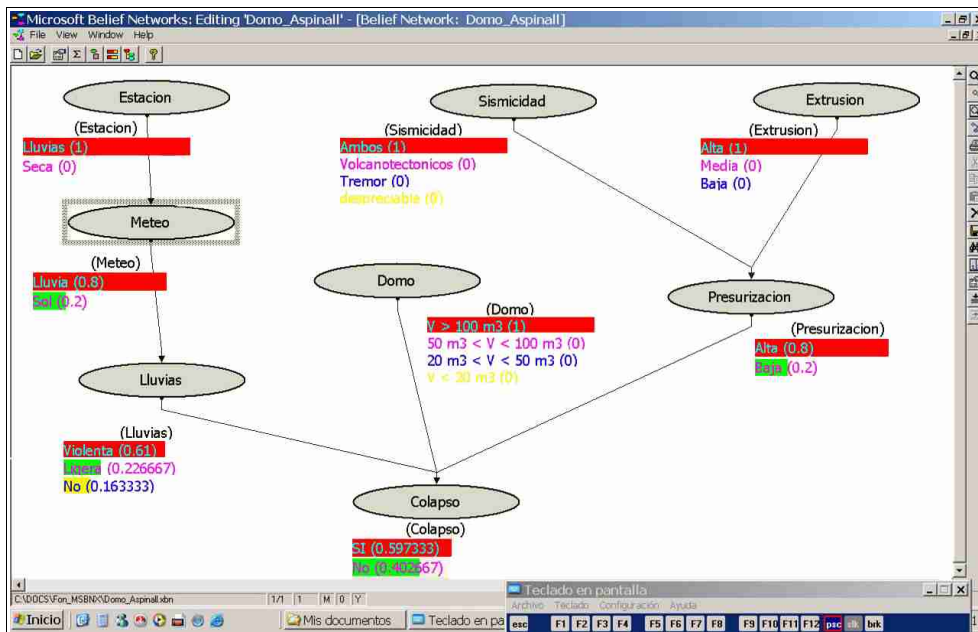


Figura 12.: Utilización de la aplicación MSBNx para estimar la probabilidad de colapso del domo durante la erupción del volcán Soufriere Hills en la isla Montserrat (Aspinall et al., 2003)

1.1.2.3 Evolución de la susceptibilidad y árbol de eventos

Las características de los datos obtenidos mediante la red de vigilancia, definen el tipo de crisis volcánica que se está produciendo y asignan probabilidades a los puntos más susceptibles de funcionar como centros de emisión. Siempre en términos probabilísticos, la susceptibilidad va cambiando a medida que evoluciona la crisis y se reciben nuevos datos. A partir de la evolución de la susceptibilidad y, teniendo en cuenta el árbol de eventos diseñado en la *fase continua* de la gestión, comienza la actualización del árbol de eventos, en el que se van asignando probabilidades a las distintas ramas preestablecidas y se van descartando otras. Este proceso permite aportar nuevos datos para la modelización del fenómeno eruptivo. Árbol de eventos y mapas de susceptibilidad son dos elementos básicos para la gestión de la crisis. Ambos productos son elaborados mediante un proceso de discusión científica o elicitación por el Comité Científico, integrando todo el conocimiento disponible en ese momento. Actualmente se está intentando automatizar al máximo este proceso mediante modelos bayesianos. (Marzocchi et al., 2008).

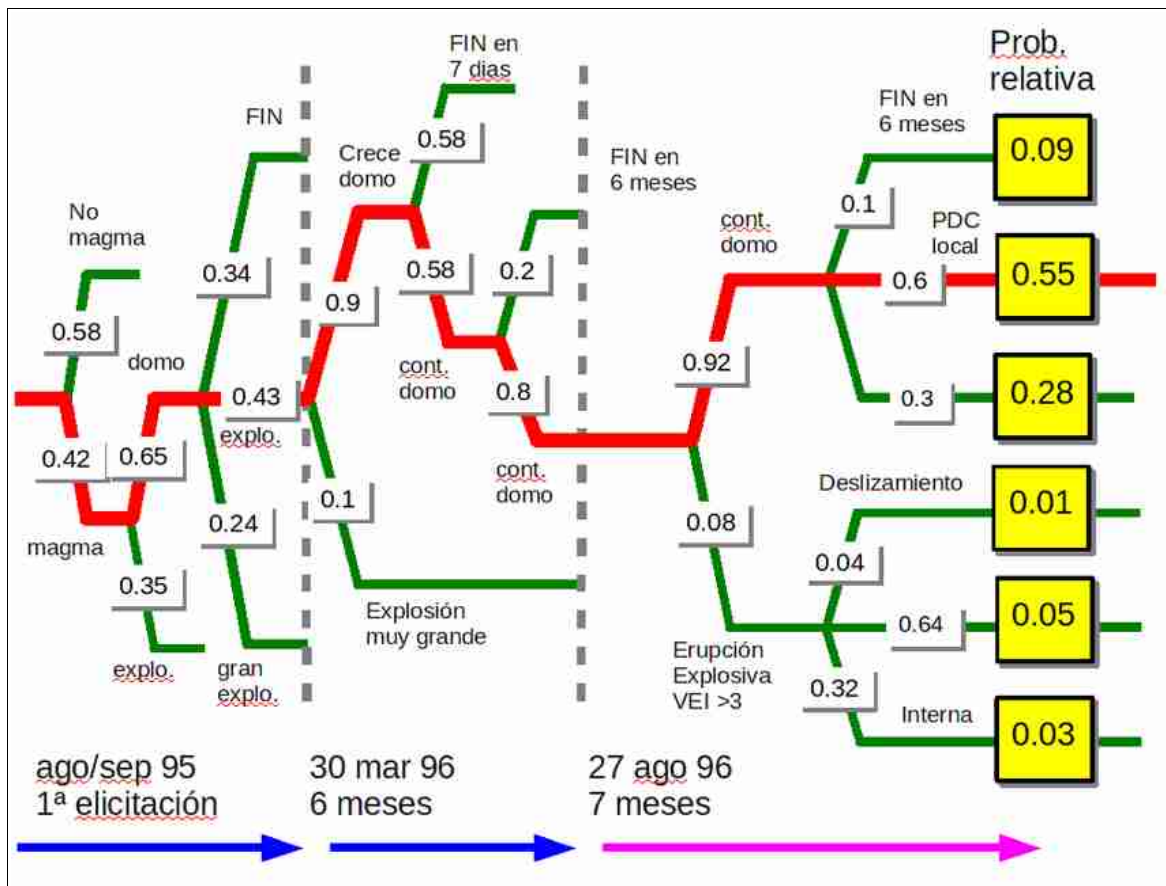


Figura 13.: Evolución del árbol de eventos en base a un proceso de elicitación de expertos, utilizado en la gestión de la crisis volcán Soufriere Hills de la isla Montserrat. En rojo se indica el proceso seguido por el volcán (Aspinall, 2006).

1.1.2.4 Simulación de erupciones

La simulación de erupciones se ha desarrollado ampliamente desde 1980, especialmente buscando la modelización física del fenómeno eruptivo. Muchos de estos modelos, de gran interés científico, son de escasa utilidad para el manejo de una crisis, pues suelen requerir el uso de supercomputadores y demasiados parámetros iniciales totalmente desconocidos antes de la erupción (Ongaro et al., 2008). En la actualidad, una nueva línea de trabajo busca construir modelos específicos para la gestión de crisis volcánicas que puedan ejecutarse en computadores personales, sin requerir excesivo tiempo de cálculo ni demasiados parámetros de entrada. Suelen combinar el uso de ecuaciones muy simplificadas del fenómeno, con información estadística y empírica (Felpeto, 2002). Para mejorar la eficacia de estos modelos, es necesario que estén integrados en el Sistema de Información Geográfico que se utilice en la gestión de la crisis (Felpeto et al., 2007).

1.1.2.5 Generación de escenarios de peligros y riesgo

En la *fase continua* se generan mapas de peligros y de riesgo de carácter estático, orientados a la Ordenación del Territorio y diseño de los Planes de Emergencia. Por el contrario, en la *fase de crisis* se cambia el concepto de mapa por el de escenario, entendiendo éste como un elemento que cambia constantemente según los datos proporcionados por la red de vigilancia, las campañas de investigación puntuales, la evolución de la susceptibilidad y el árbol de eventos. Utilizando los simuladores desarrollados por operadores expertos, se generan todos los escenarios esperados. Los escenarios de peligros permiten tener una visión amplia de todos aquellos posibles materiales expulsados durante la erupción y cómo afectan al territorio circundante según la intensidad que se les asigne.

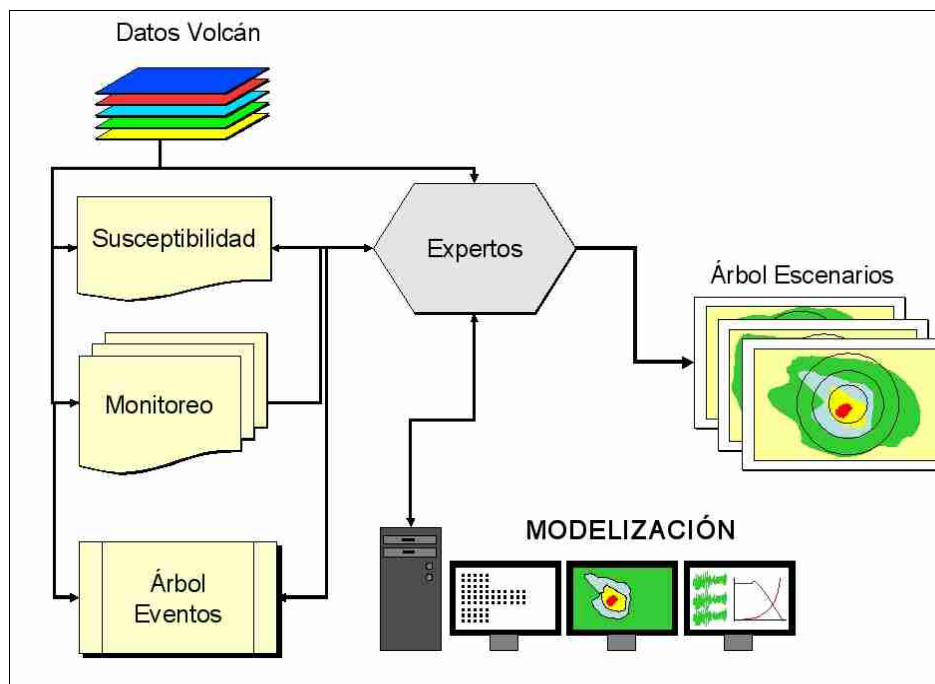


Figura 14: Mediante la combinación de la información disponible y la valoración del grupo de expertos, se van obteniendo escenarios. Éstos son modificados a medida que se reciben nuevos datos. Los escenarios se envían a Protección Civil en un formato simplificado para que sea fácilmente comprensible.

Una vez obtenidos los Escenarios de Peligro y a partir de la actualización de las bases de datos socio-económicas y de la cartografía de la zona afectada, pueden realizarse los Escenarios de Riesgos, fundamentales para los Planes de Emergencia de Protección Civil (Bonifaz et al., 1995, Lirer y Vitelli, 1998, Felpeto et al., 2007). Mediante estos escenarios puede tenerse una visión aproximada del número de personas afectadas, infraestructuras dañadas, etc. y, por tanto, de los medios necesarios que habría que movilizar al activar el Plan de Emergencia.

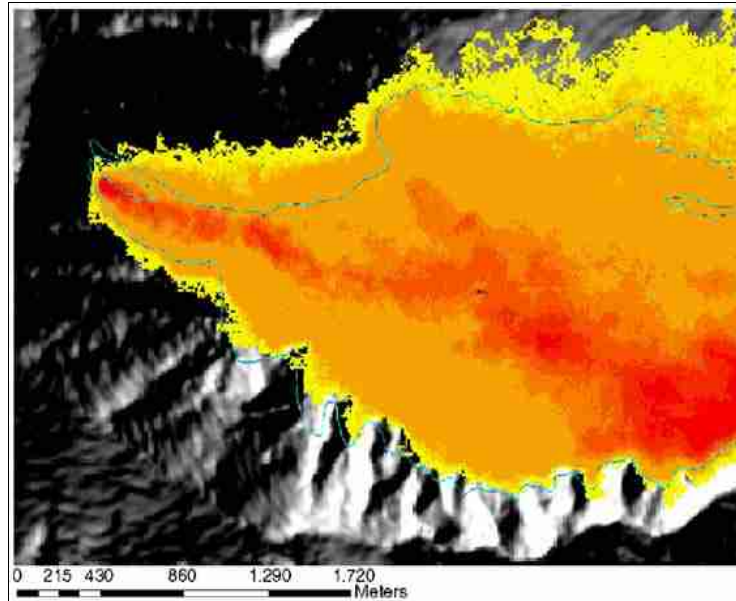


Figura 15: Simulación de un flujo lávico en el volcán Etna, Italia (Damiani et al., 2006)

Estos productos se obtienen directamente con el Sistema de Información Geográfica utilizado, cruzando el resultado de las modelizaciones con las bases de datos georreferenciadas disponibles de población, infraestructuras y vulnerabilidades. Cuanto más precisa sea esta información, mayor calidad tendrán los escenarios obtenidos. Este proceso se elabora para cada uno de los escenarios previstos en el árbol de eventos, obteniéndose una función que expresa la probabilidad de que ocurra ese escenario y produzca un nivel de pérdidas económicas y muertes determinado (Sparks y Aspinall, 2004).

1.1.2.6 Modelización de la emergencia

Actualmente se están desarrollando herramientas para ayudar a la gestión de una emergencia, especialmente para incendios, huracanes e inundaciones, tanto aplicables a escalas de mucho detalle, por ejemplo un incendio en un edificio o una pequeña población (Fahy, 1994, Malone et al., 2001), como a ámbitos geográficos más extensos (Post, 1999). Los simuladores de evacuaciones son una herramienta útil para calcular, entre otros aspectos, los tiempos necesarios y las rutas más adecuadas para llevar a cabo la evacuación, sin embargo, al igual que el resto de simuladores, deben considerarse como una ayuda y no como la solución del problema (Liu y Tuttle, 2008). Los simuladores de evacuaciones se basan en el conocimiento previo de la zona, su red viaria, población, red hidrográfica y aquellos otros elementos que puedan afectar a la evacuación y que se hayan incluido en el modelo. Como en todo modelo, la calidad de los datos disponibles y la experiencia del operador, son fundamentales para que la información generada sea fiable.

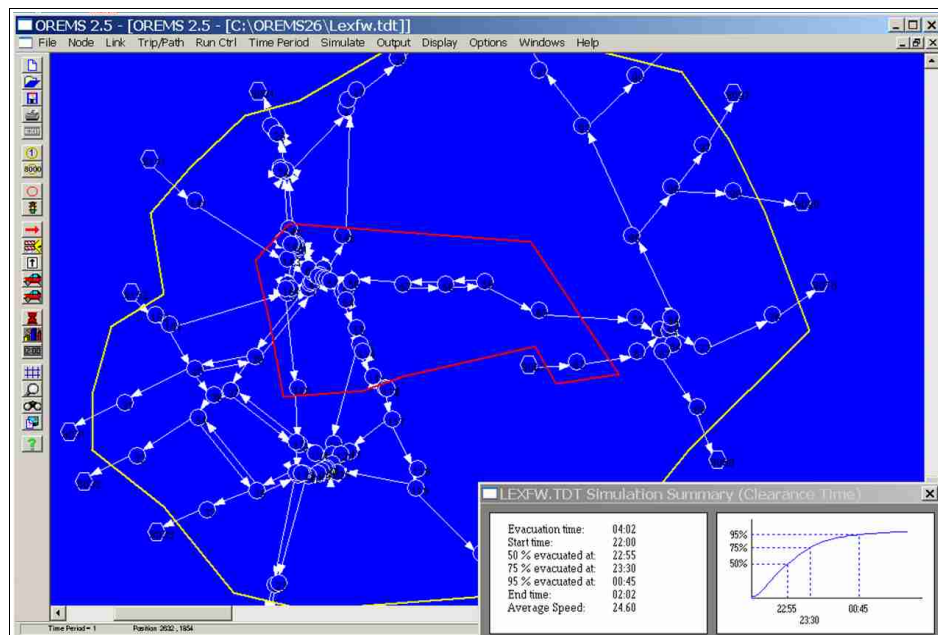


Figura 16: Ejemplo de modelo de evacuación utilizando el programa OREMS, desarrollado en el Center for Transportation Analysis Research Brief (CTA), en Oak Ridge, Estados Unidos.

En el caso concreto de evacuaciones ligadas al fenómeno volcánico, no se han encontrado referencias publicadas de modelos específicos de evacuación en las revistas del ámbito, sin embargo, se conocen intentos de adaptar modelos de tráfico urbano que no tienen en cuenta las peculiaridades de la emergencia volcánica ni la sobrecarga derivada de un evento de estas características. Salvo que un centro de emisión surja en una zona deshabitada o protegida por el relieve, la mejor opción, ante la probabilidad de un evento eruptivo, es siempre realizar una evacuación preventiva.

1.1.3 Activación del Plan de Emergencia

Finalmente, si la actividad volcánica continúa en aumento, será necesario activar el Plan de Emergencia que debe estar definido previamente. Si la estructura operativa ha funcionado correctamente, Protección Civil deberá tener suficiente información para saber cuándo, cómo y dónde debe actuar. La activación del Plan de Emergencia es una decisión fundamental porque cuando las actuaciones afectan a muchas personas se incrementa la complejidad de la gestión y la toma de decisión hay que hacerla con valores muy bajos de probabilidad (Woo, 2008). Es en este momento cuando la educación e información de la población adquiere especial importancia. Si en la *fase continua* no se realizaron los preparativos necesarios, es ahora cuando se notarán los fallos y errores cometidos. En zonas muy poco pobladas la gestión es mucho más sencilla y la erupción puede considerarse sólo desde un punto de vista científico, salvo que afecte al tráfico aéreo (Bertolaso et al., 2009).

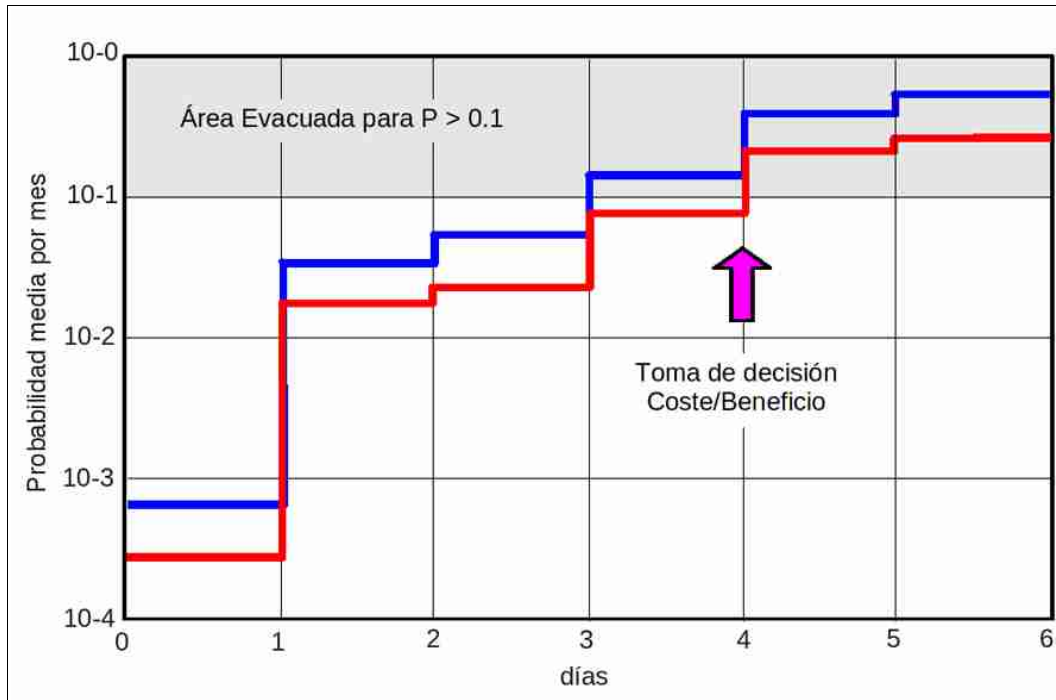


Figura 17: Horquilla para la toma de decisiones, obtenida mediante elicitación de expertos, durante el ejercicio MEXIMEX de simulación de evacuación del área próxima al volcán Vesubio, Italia (Woo, 2008)

1.1.3.1 Evacuación preventiva

Evacuación preventiva, dos palabras con significado propio que definen el tipo de gestión necesario en los momentos de crisis volcánica. La actividad volcánica requiere la evacuación de toda de la población en las zonas más expuestas. Aún hoy en día, saber cómo será la erupción resulta complicado, sin embargo, sí puede conocerse el comportamiento del volcán en el pasado y de ahí, extrapolar para diseñar el escenario máximo posible esperado. Este escenario es el que definirá el área máxima con probabilidades de ser destruida y, por tanto, la que requerirá la evacuación de los habitantes desde un primer momento.

Por otra parte, se habla de evacuación *preventiva*, porque sigue siendo sumamente complicado establecer un pronóstico claro para el momento de la erupción. Incluso con todos los indicadores mostrando una gran probabilidad de erupción, ya ha habido numerosos casos, en los que el proceso se detiene y permanece estable durante años (SMEC International Pty Ltd, 1999). Pese a todo, siempre es conveniente llevar a cabo una evacuación, aunque en última instancia no se produzca la erupción, por ello se la califica como preventiva (Barberi et al., 1984).

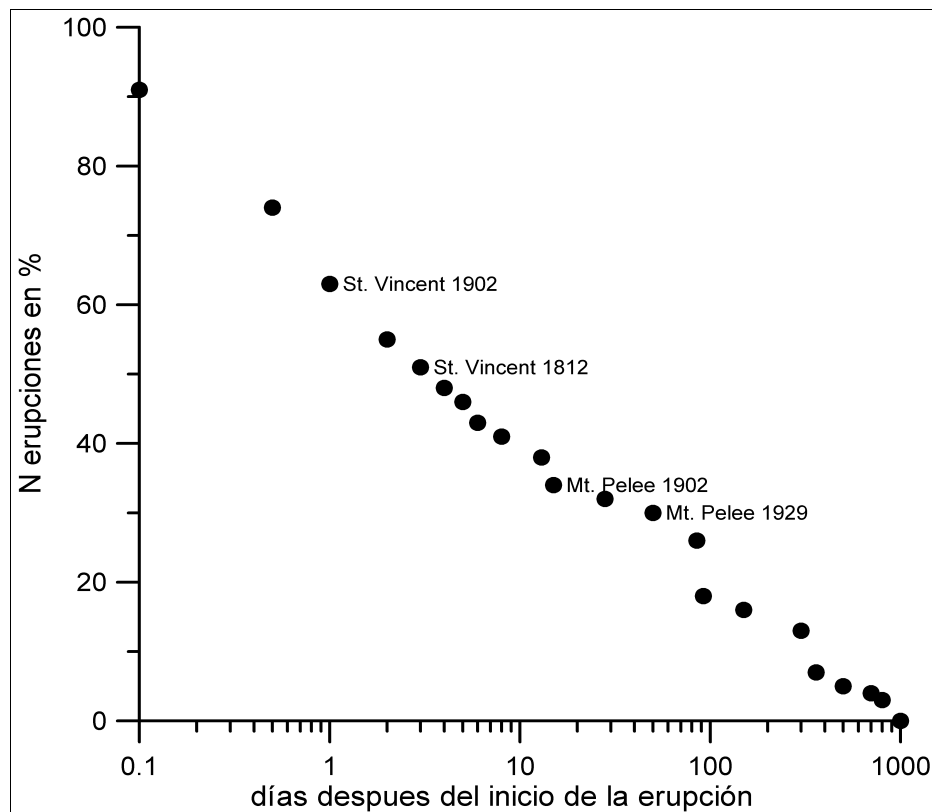


Figura 18: El tiempo que transcurre, una vez iniciada la erupción hasta la emisión del primer flujo piroclástico de más de 5 km de recorrido, en general es muy breve, menos de 12 horas en la mayoría de los volcanes (Tomblin y Michael, 1978). En base a estos datos, cuando en un volcán se está gestionando una crisis en cuyo árbol de eventos está contemplada esta posibilidad, debe realizarse siempre una evacuación preventiva, no puede esperarse a que se inicie la erupción.

Mantener a la población evacuada resulta complicado, especialmente en los casos en los que el pronóstico falla o se prolonga en el tiempo. Hay una pérdida de credibilidad de los científicos, politización, el gasto se incrementa notablemente, etc. Pese a todo, es la única opción viable hoy en día si se quieren salvar vidas (Cardona, 1997).

Una población educada debe de comprender que el regreso a casa por un pronóstico fallido es motivo de alegría porque, entre otras cosas, no ha pasado nada y pueden continuar con su vida. El caso contrario posiblemente implique la pérdida total de sus bienes. Por ello, no hay que culpar al estamento científico cuando se lleva a cabo una evacuación preventiva y posteriormente no hay erupción. El conocimiento científico actual no permite garantizar el éxito del pronóstico, con la anticipación requerida para realizar la evacuación que permita poner a salvo a todos los habitantes, por lo que la decisión de evacuar se toma cuando se estiman probabilidades de erupción de sólo el 10 % (Marzocchi y Woo, 2007, Woo, 2008). Las evacuaciones preventivas se realizan dentro de una ventana temporal que viene dada principalmente por el tiempo necesario que requiere la Protección Civil para evacuar el área.

Este tiempo varía en función del número de habitantes y, sobre todo, de su preparación. Cuanto mayor sea la ventana temporal, mayor será la probabilidad de errar en el pronóstico, algo que resulta sumamente delicado debido a la pérdida de credibilidad que se produce en las áreas donde la población no ha sido convenientemente educada en el fenómeno volcánico. En cualquier caso, debe quedar claro que la estrategia a seguir en el caso de una erupción peligrosa es evacuar siempre, antes que comience, pues luego resulta sumamente complicado. Bien porque puede destruir totalmente las zonas expuestas y no quedar nadie a quien evacuar, bien porque en zonas menos expuestas, los caminos pueden quedar prácticamente inutilizados debido a la caída de ceniza y bombas (De la Cruz-Reyna y Tilling, 2008).

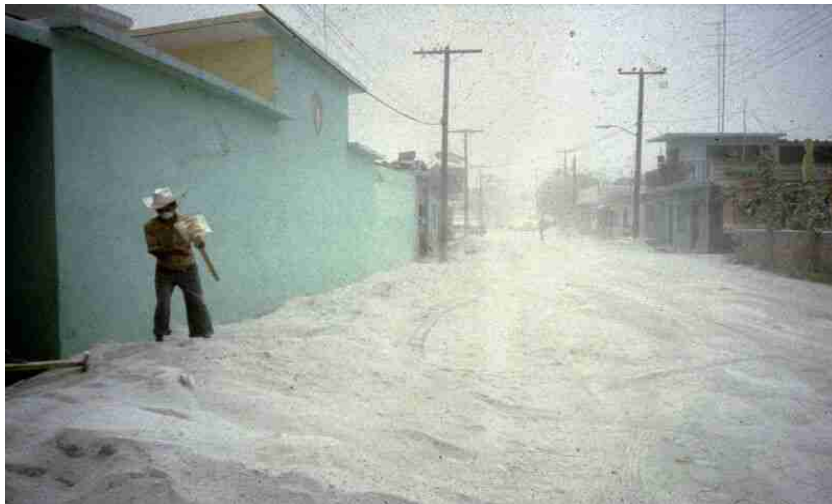


Figura 19: Interrupción de las vías de comunicación por caída de cenizas durante la erupción del volcán Chichón, México, en 1982. La imagen corresponde a la población de Pichucalco, situada aproximadamente a 20 km en línea recta del volcán. (foto S. De la Cruz-Reyna).

1.1.3.2 Comportamiento de la población en una situación de emergencia

El comportamiento de la población ante situaciones de emergencia depende de muchos factores, siendo el pánico el más destacado. La experiencia que la población tenga sobre el fenómeno presenta aspectos positivos pero, en muchos casos, puede convertirse en contraproducente cuando el fenómeno tiene un carácter recurrente con un nivel de intensidad medio, pues no conciben eventos de mayor magnitud. La educación específica sobre el fenómeno y sus consecuencias, debe suplir la falta de experiencia en unos casos, o corregir la rutina en otros (Llinares et al., 2004). Cuanto menor sea la preparación -experiencia más educación- mayor será el grado de incertidumbre sobre el comportamiento de la población y más probable el desencadenamiento de una situación de pánico, aspecto que deberá tenerse en cuenta en el diseño de los escenarios de evacuación.

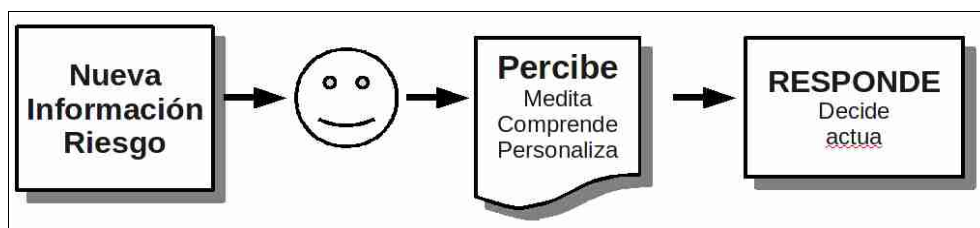


Figura 20: Proceso de percepción del riesgo por parte de la población. La complejidad de este proceso hace muy difícil pronosticar su comportamiento.

1.2 Ejercicios y simulacros

La realización de ejercicios y simulacros es la única posibilidad que hay para evaluar las cualidades de un Plan de Emergencia para un fenómeno con periodos de retorno muy elevado; de otro modo no hay ocasión de probarlo y corregir errores antes de su aplicación en una situación real. A esto hay que añadir que, el entorno humano y los medios disponibles, cambian continuamente, lo que implica tener que reajustar y modificar constantemente el Plan de Emergencia. En el caso del riesgo volcánico, esta situación es aún más acusada debido a la necesidad de tener que coordinar un equipo multidisciplinar muy amplio en el que es primordial la participación del grupo de expertos que se integran en el Comité Científico Asesor. Como ejemplo de ejercicio de este tipo, se puede tomar el MESIMEX, realizado en la zona del volcán Vesubio para evaluar el Plan de Emergencia (DPC, 1995), Nápoles (Italia), en octubre de 2006 (Marzocchi et al., 2008) y el llevado a cabo en 2009 en el volcán Chichón, México con el mismo objetivo.



Figura 21: Ejercicio MESIMEX: discusión en el grupo de síntesis al obtener unos resultados inesperados en la simulación de la caída de cenizas, consecuencia de unas condiciones meteorológicas anómalas. (Foto R. Ortiz, 2006)

La diferencia fundamental entre ejercicio y simulacro es que el primero está programado con mucha antelación y todos los participantes saben cuando empieza, cuando termina y las horas que van a dedicar cada día. Por el contrario, en los simulacros se trata de representar con la máxima fidelidad posible una situación de emergencia y, teóricamente, nadie conoce el momento del inicio ni su desarrollo. Evidentemente, la posibilidad de desarrollar con éxito un simulacro es muy baja si no se han llevado a cabo antes ejercicios.

La planificación de un ejercicio para una situación de riesgo volcánico, siguiendo la pauta de MESIMEX y la que hemos desarrollado para el volcán Chichón en 2009, incluye tres fases principales, cada una con sus correspondientes acciones, análogas a las que se deben realizar en un caso real.

Fase inicial

- Detección de señales anómalas.
- Comprobación de equipos y análisis de las señales.
- Activación del Plan de Emergencia.
- Constitución del Comité Científico.

Fase de crisis

- Analizar la información disponible.
- Sugerir instrumentación complementaria y activar Centro de Atención Permanente.
- Desarrollar o actualizar el árbol de eventos y el mapa de susceptibilidad.
- Asignar probabilidades y tiempos a los escenarios posibles.
- Elaborar mapas de impacto para los distintos escenarios.
- Cuantificar el riesgo.
- Actualizar el Plan de Emergencia en función de los escenarios propuestos.
- Planificar las evacuaciones.
- Proceder a la toma de decisiones.

Fase final

- *Evacuar las zonas de impacto.*
- *Notificar al VAAC (Volcanic Ash Advisory Center)*
- *Notificar a los aeropuertos.*

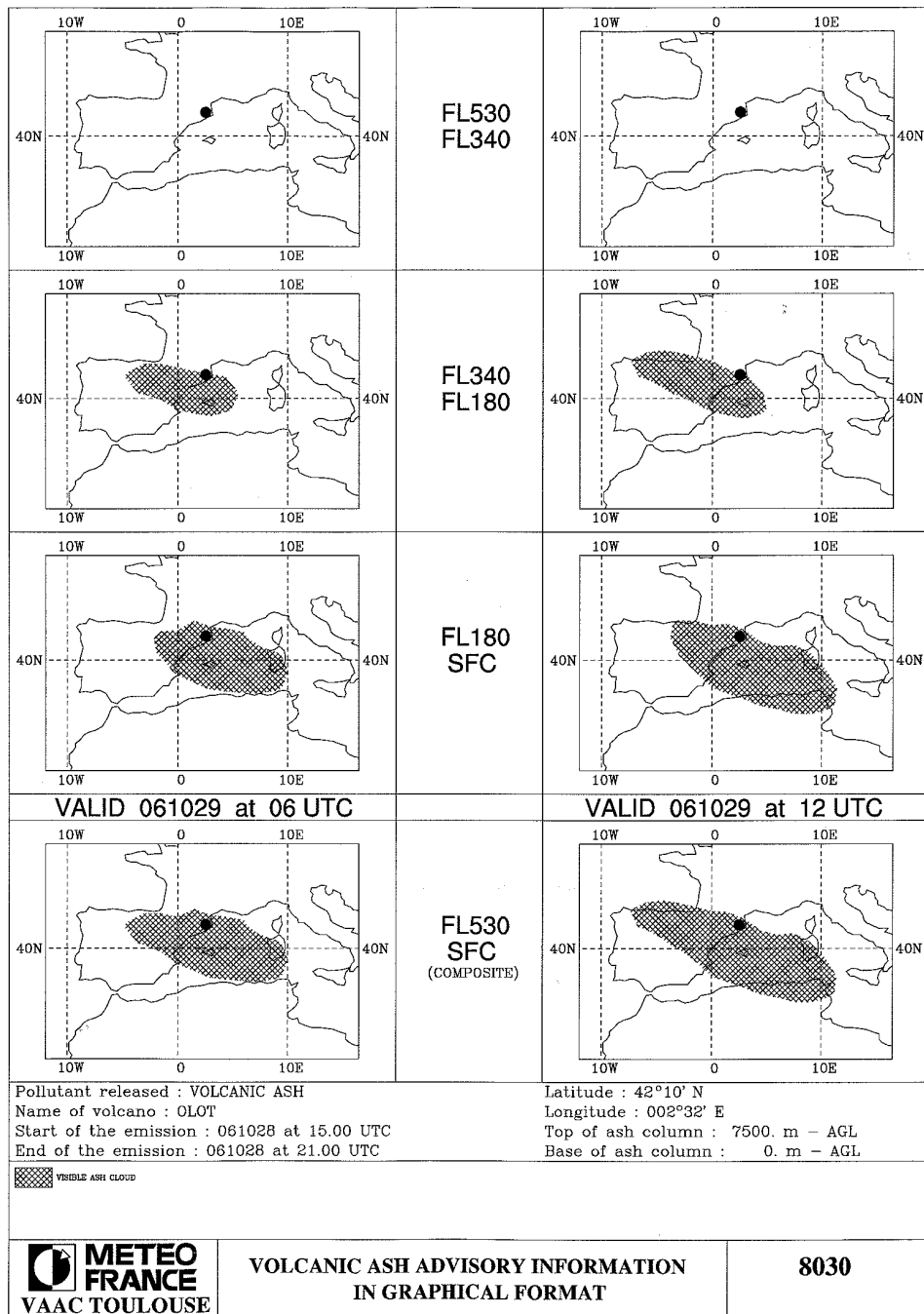


Figura 22: Mapas generados por el VAAC de Toulouse (Francia), para una erupción simulada durante un ejercicio organizado por el CSIC en Olot (Girona, España)

Este ejercicio es muy difícil de realizar en menos de 5 días. Lógicamente, es posible realizar ejercicios parciales, en los que sólo intervengan algunos grupos, con duraciones menores, como los realizados durante el *Curso Internacional de Volcanología y Geofísica Volcánica CSIC* en 1998, 2005 y 2006, aunque nunca con un tiempo inferior a dos días. Las evacuaciones no tienen que cubrir el total de la zona de impacto establecida, pero sí es interesante trabajar sobre áreas conflictivas. Tampoco es necesario evacuar a todas las personas afectadas. El desarrollo práctico de un ejercicio depende de la idiosincrasia de cada país además de los medios disponibles y de la percepción del riesgo volcánico por parte de la población.



Figura 23: Uno de los problemas que se plantea en los centros de acogida y refugio es el estrés al que está sometida la población, especialmente los niños. Hay que tener previsto actividades lúdicas para entretenerlos. La imagen recoge un payaso en un punto de registro (check point) durante el ejercicio MEXIMEX (Foto, R. Ortiz, 2006).

1.3 Integración en el sistema de gestión europeo de crisis volcánicas

La Comunidad Europea considera que la gestión de catástrofes, tanto de origen natural como antrópico, debe ser llevada a cabo con una metodología común, como se recoge en el documento UE press, 2009. En estos últimos años, se han llevado a término diversos programas de investigación, financiados por la Unión Europea, dedicados a la gestión del riesgo volcánico en Europa. Esta serie de proyectos se inicia, en coincidencia con la proclamación por Naciones Unidas de la Década Internacional para la Mitigación de Desastres Naturales 1990-2000, (ONU resolución 44-236-1987) y su programa Volcanes de la Década, con los Volcanes Laboratorio Europeos (EVOP), siendo el Teide el único volcán que fue

incluido en ambos programas, lo que permitió realizar un gran esfuerzo para obtener el conocimiento base del volcán. Posteriormente, se inician una serie de programas dedicados al desarrollo instrumental para la vigilancia de volcanes activos como el proyecto TEKVOL ENV4-CT96-0251, E-RUPTION EVR1-ZT-2001-40021, para el conocimiento de la estructura interna de los volcanes y EXPLORIS EVR1-ZT-2002-40026 (Baxter et al., 2008b), para el estudio y modelización del volcanismo explosivo, habiendo participado el CSIC en todos ellos.

Hasta este momento, se han desarrollado aplicaciones informáticas para la modelización de erupciones que incluyen, desde modelos muy elementales, útiles en el momento de definir rápidamente el impacto de una posible erupción (Felpeto, 2002, 2007), hasta modelos muy elaborados que requieren supercomputadores y que se aplican para el estudio de la física del fenómeno eruptivo (Ongaro et al., 2008, Macedonio et al., 2008). Actualmente, se está trabajando en programas que permitan establecer pronósticos (Tarraga, 2007) e integración de la susceptibilidad y el árbol de eventos con el sistema de vigilancia (Marzocchi et al., 2008).

Con el proyecto EXPLORIS se inicia la realización de programas, encaminados directamente a la valoración de los parámetros necesarios para la estimación del riesgo, como es el estudio de vulnerabilidades (Zuccaro et al., 2008, Martí et al., 2008c) y la posibilidad de supervivencia del ser humano ante una erupción explosiva (Baxter et al., 2005). En este contexto se incluye el presente trabajo, cuyo objetivo es brindar a los responsables de la evacuación una herramienta que permita establecer y valorar rápidamente las posibles rutas de evacuación y adaptarlas en el caso de que un evento inhabilite parcialmente la red de comunicaciones.

1.4 Modelos de evacuación

En la bibliografía no están referenciados modelos de evacuación desarrollados para áreas con actividad volcánica. Sin embargo, existen muchos programas específicos para otro tipo de evacuaciones que se pueden clasificar en tres grandes grupos:

- Modelos asociados a los fenómenos meteorológicos de gran intensidad y sus efectos derivados, generalmente aplicados a amplias zonas de territorio.
- Modelos aplicados sobre poblaciones situadas entorno a instalaciones consideradas de alto riesgo, centrales nucleares, industrias químicas, etc.
- Modelos aplicados a edificaciones o espacios reducidos, habitualmente asociados a incendios.

Aunque es un tema que lleva estudiándose desde 1970, es a partir de los años 90 cuando se observa un incremento en el desarrollo de modelos de evacuación, sobre todo debido a la reducción de los costes en los computadores y al incremento en la capacidad de cálculo, que permite la elaboración de modelos más complejos. Destaca el número de modelos específicos para huracanes (Mei, 2002), producción que ha ido en aumento tras el desastre del Katrina (Wikipedia, The Free Encyclopedia, 2009) y recientemente, para evacuación de espacios limitados debido a atentados terroristas (Kwan y Lee, 2005).

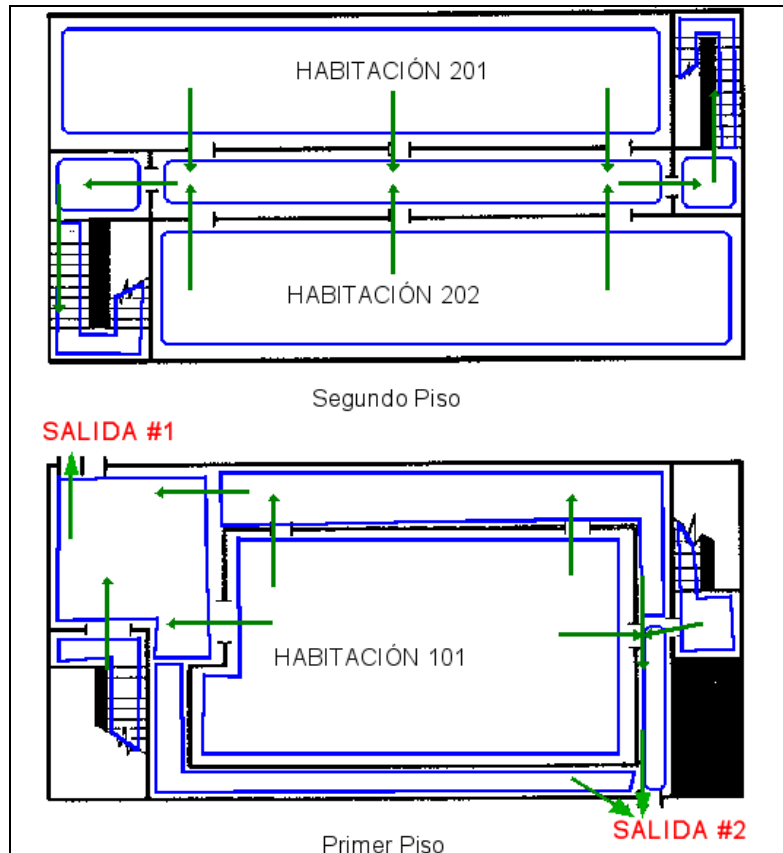


Figura 24: En el modelo de Lu et al., 2003 convierten los diferentes espacios en nodos, a los que se les asigna una capacidad máxima e inicial y las rutas de salida en vectores, con una capacidad máxima de paso y un tiempo de recorrido.

Hay que destacar que los modelos de evacuación para huracanes han sido desarrollados para la costa Sureste de Estados Unidos, un área que presenta unas características socio-económicas y culturales muy específicas y que está habituada a sufrir estos impactos con mucha frecuencia, por ello, resulta complicado establecer comparaciones válidas, sobre todo desde el punto de vista del comportamiento de la población, con otras zonas. Pese a que el proceso de evacuación, sacar a las personas de un área de impacto potencial y llevarlos a una zona segura, mantiene características similares en todos los casos, son los aspectos del comportamiento humano, las estrategias adoptadas por parte de las autoridades y la dinámica del fenómeno que genera la amenaza, lo que pueden hacer variar considerablemente el desarrollo del proceso. En Japón existe una amplia cultura del riesgo pero las características de la sociedad japonesa hacen complicada la adaptación de los modelos de comportamiento y de actuación a las sociedades latinas.

Otra consideración sobre los modelos de evacuación es que, muchos de ellos, están especializados en el tratamiento de aspectos muy concretos del proceso de evacuación, como puede ser la gestión de los cruces, la optimización de la red de transporte, etc. (Cova y

Johnson, 2003). Igualmente, no consideramos los modelos que requieren el uso de supercomputadores pues, difícilmente, pueden utilizarse en una situación de crisis volcánica, salvo que el volcán se encuentre próximo a una zona muy desarrollada para poder tener acceso directo a estos medios.

1.4.1 Huracán versus volcán

Dado que no se han encontrado experiencias de modelos de evacuación específicos para la gestión de crisis volcánicas, se han utilizado los modelos aplicados a zonas de huracanes como referencia más próxima. Hay algunos elementos en la gestión de la crisis de ambos fenómenos naturales que pueden tener cierta semejanza, aunque hay otros que difieren en mayor medida.

1.4.1.1 Seguimiento del fenómeno

Hoy en día, los modelos meteorológicos y los satélites específicos proporcionan información accesible mediante Internet que permiten fácilmente seguir la trayectoria de un huracán, al mismo tiempo que se reciben constantemente los pronósticos sobre la evolución e intensidad, horas estimadas de llegada, etc... Esta circunstancia facilita que las personas puedan estar pendientes del fenómeno natural, al tiempo que proporciona una cierta sensación de control sobre la situación. Pese a todo, el momento, lugar e intensidad no se conocen con exactitud hasta poco tiempo antes del impacto (Frieser, 2004).



Figura 25: Trayectoria y evolución del huracán Katrina, del 25 al 30 de agosto de 2005 (Foto NASA y trayectoria por el National Hurricane Center, USA)

El fenómeno volcánico es muy difícil de seguir por parte de los habitantes de la zona próxima al volcán. Incluso el equipo científico no puede definir el momento de inicio de la

erupción hasta 24 o 48 horas antes, aunque la población pueda haber percibido manifestaciones desde hace años. Muchas veces, toda la información que se maneja para tomar la decisión de evacuar es meramente instrumental, sin que la actividad sea percibida por la población. Estos aspectos generan mayor estrés o incertidumbre ante el fenómeno volcánico que ante otro tipo de fenómenos naturales de los que ya se ha hablado. Además, en relación al centro de emisión de la actividad volcánica se dan dos situaciones:

- El punto de origen está bien definido y, por tanto, la zona potencialmente afectada también.
- El punto de origen no está definido, puede producirse casi en cualquier área, si bien hay zonas más susceptibles que otras.

La ventaja de conocer el punto de origen es que permite organizar mejor los planes de evacuación, quedando bien definidas las zonas de destino a salvo de la actividad del volcán. Pese a todo, en ninguno de los dos casos se conocerá el impacto hasta el momento de la erupción, por ello, siempre se procura actuar basándose en el escenario de mayor impacto posible, salvo en los volcanes con una actividad muy recurrente y homogénea, en la que se puede pronosticar su dinámica. Por contrapartida, en el caso de los huracanes no se tiene clara la trayectoria final hasta que está muy próximo a la costa, pero sí se conoce su intensidad antes de que toquen tierra, aspecto importante que determina el número de personas que evacuarán; sólo en los casos extremos se recomienda la evacuación total.

1.4.1.2 Organización de las evacuaciones

En los huracanes, las evacuaciones se producen como máximo 24 horas antes de su llegada y suelen tener un grado de organización menor; las personas utilizan sus propios medios de transporte para llevarla a cabo y la decisión final de evacuar no siempre es acatada por todos (Barrett et al., 2000). En el caso de los volcanes, las evacuaciones se planifican, cuando es posible, con bastante más antelación, entre otras cosas porque no siempre es fácil determinar el momento exacto en el que se producirá la erupción y hay que dejar una ventana amplia de seguridad (Woo, 2008). Además, habitualmente las evacuaciones son dirigidas y organizadas, sobre todo porque muchas veces la población afectada no tiene una percepción clara del peligro y/o carece de los recursos necesarios para evacuar por sus propios medios.

1.4.1.3 Periodo de retorno

Los huracanes poseen periodos de retorno más cortos, incluso para fenómenos de intensidad relativamente alta (3 o 4). Cada año, hay una temporada de huracanes y las áreas expuestas están siempre alerta durante ese periodo (Bitrán, 2001). Debido a esta frecuencia, numerosas personas se han visto afectadas varias veces a lo largo de su vida, adquiriendo experiencia y capacidad de actuación. Las erupciones volcánicas, especialmente con VEI superior a 2 (Simkin and Siebert, 1994), presentan siempre periodos de retorno mucho más largos, hasta el punto que en muchas sociedades acaba olvidándose la presencia del volcán y la amenaza que representa. Esta pérdida de memoria histórica disminuye considerablemente el grado de preparación de una sociedad para enfrentarse a una erupción volcánica.

1.4.1.4 Experiencia ante el fenómeno

Desde el punto de vista del comportamiento de las personas, basado principalmente en su experiencia, los huracanes poseen periodos de retorno más cortos que los volcanes, por lo que se requieren políticas educativas menos exigentes dado que muchas personas han vivido situaciones semejantes en el pasado. Por el contrario, en muchas zonas volcánicas la memoria histórica del fenómeno se ha perdido y los habitantes desconocen totalmente qué deben hacer en caso de una erupción. Esto complica mucho más el proceso de evacuación y genera un grado mayor de incertidumbre en las fases finales antes del impacto, especialmente, si no se han aplicados planes educativos a lo largo del tiempo.

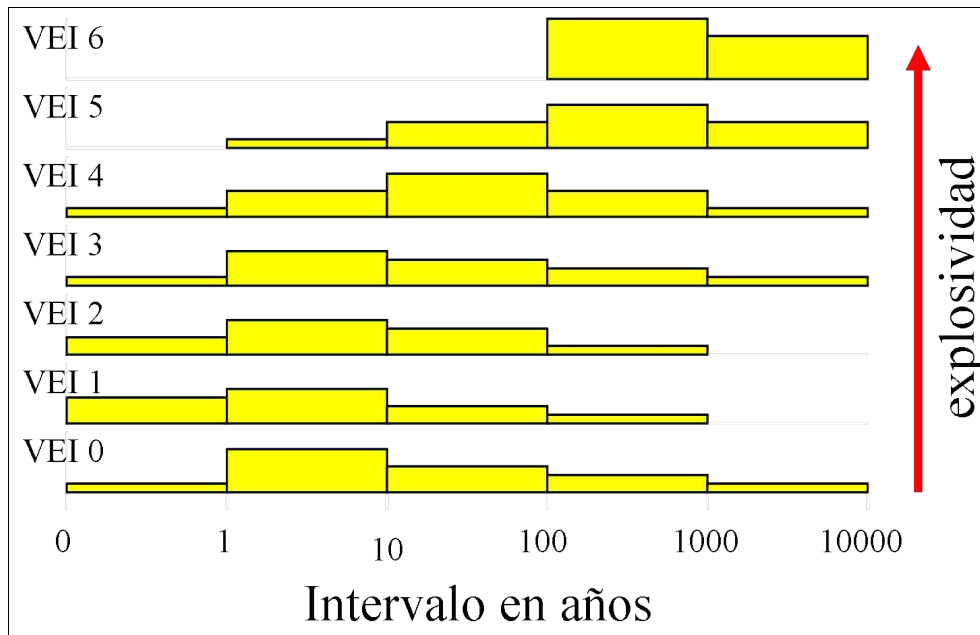


Figura 26: Periodos de retorno para las erupciones según su índice de explosividad volcánica VEI (Simkin and Siebert, 1994).

1.4.1.5 Daños en la red de transporte

Ambos fenómenos, huracanes y erupciones volcánicas, dañan la red de transporte, por ello es esencial realizar las evacuaciones antes del impacto (Barrett et al., 2000). La única diferencia es que los huracanes suelen afectar a un área más extensa, mientras que la zona principal de impacto de los volcanes, salvo en el caso de las grandes erupciones, está más delimitada. Pese a todo, este aspecto no es tratado habitualmente en los modelos de huracanes, centrados mucho más en la gestión de las intersecciones y la adición de carriles que en la posibilidad de que algunas vías de transporte queden fuera de servicio. En general, asumen que la evacuación se lleva a cabo antes del impacto y no mientras se produce.

1.5 Elementos de los modelos de evacuación

La bibliografía consultada muestra que los diferentes modelos de evacuación propuestos desde finales de los años setenta han ido incorporando una serie de elementos, cuya importancia ha estado en función de las prioridades que se han considerado en cada momento. En un principio, los modelos de evacuación estaban muy asociados a los simuladores de tráfico existentes, por ello, centraban su esfuerzo en determinar cómo se comportaba éste y sólo incorporaban las decisiones del conductor a la hora de escoger una u otra ruta. Con el tiempo, ha ido cobrando especial importancia el comportamiento de la población ante situaciones de emergencia, la toma de decisiones ante la posibilidad o no de evacuar, los destinos elegidos, etc. Los modelos más recientes intentan tener en cuenta multitud de aspectos, aunque al estar muchos de ellos desarrollados específicamente para el sur de Estados Unidos, algunas cuestiones son difícilmente extrapolables a otros ámbitos, además de que el propio fenómeno natural que genera la amenaza, también es distinto al considerado en este trabajo.

1.5.1 El comportamiento de la población ante evacuaciones

Para el desarrollo de muchos modelos de evacuación por amenaza de huracanes, u otros fenómenos naturales o antrópicos, se utilizan datos procedentes de encuestas, especialmente los relacionados con el comportamiento de las personas evacuadas. Estos datos, combinados con otros, son utilizados para calcular, de forma aproximada, los tiempos de reacción y preparación una vez dada la alerta, la posibilidad de que decidan quedarse o no y los lugares de destino. En general, ayudan a determinar el comportamiento de los evacuados y, por tanto, las decisiones que se toman durante el proceso de evacuación (Post, 1999, Mei, 2002).

Un ejemplo de este tipo de encuesta contendría las siguientes preguntas :

- Número o porcentaje de personas evacuadas
- Factores que afectaron a las personas para tomar la decisión de evacuar.
- Lugar y tipo de destino.
- Momento de salida
- Número y tipo de vehículos usados.
- Perfil socioeconómico de los encuestados.

También, Shepherd y Sime (1998), destacan la importancia que tiene el contenido y la forma en que se transmiten los mensajes de alerta y cómo pueden condicionar la reacción de las personas a la hora de la toma de decisiones. Este mismo autor distingue entre tres tipos de modelos que representan la relación entre la forma en la que se da la alerta y la respuesta del grupo social al que va dirigida: en el primero, priman los aspectos psicológicos o las cuestiones sociales a la hora de entender la alerta y ejecutar una respuesta, en el segundo, son los agentes físicos externos, las amenazas, las que condicionan las alertas y las respuestas y el tercero es una mezcla de los dos anteriores.

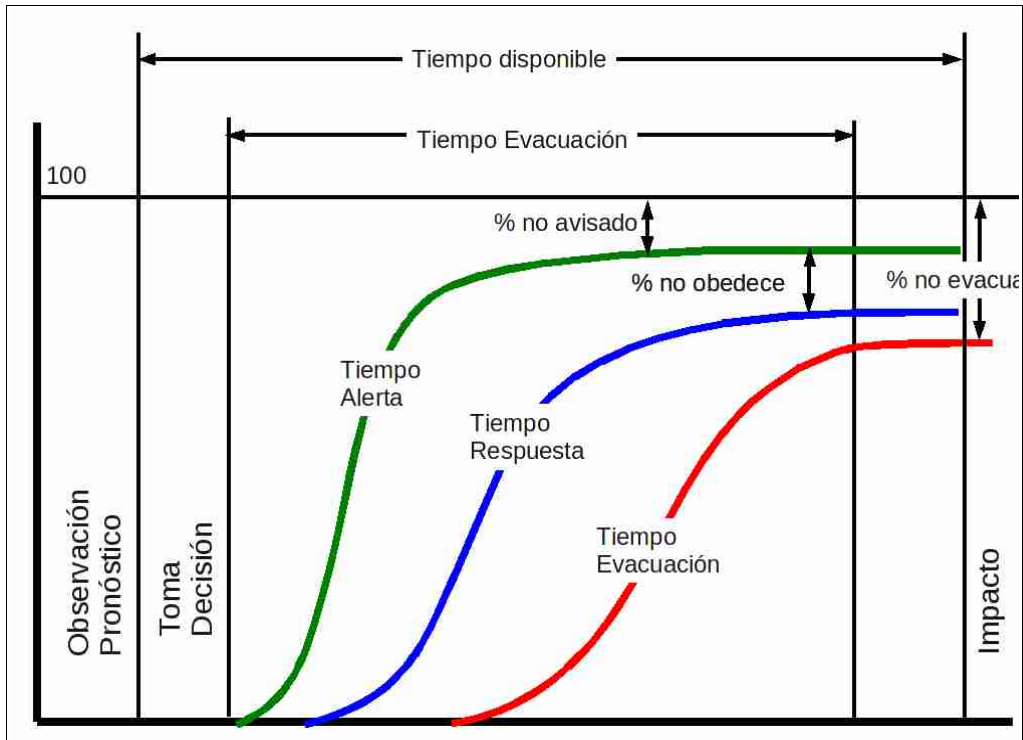


Figura 27: Modelo simplificado del comportamiento de la población a partir del momento en el que se publica la orden de evacuación (Modificado de Jonkman, 2003 en Frieser 2004)

En Frieser (2004), se realiza un estudio de evacuaciones masivas por inundación en Holanda, introduciendo la utilización de funciones de distribución para estudiar el comportamiento de la población, desde el momento en el que se obtiene un pronóstico de inundación. También considera la oportunidad de evacuar en función del coste-beneficio de la operación.

Siguiendo esta línea metodológica, en este trabajo, para representar el comportamiento de la población se han introducido dos funciones distintas, la primera es la función de incorporación a la evacuación, cuya aplicación puede ser homogénea o específica para cada una de las zonas definidas, entendiendo que será siempre la totalidad de la población la que evacua. La segunda, es una función que representa los efectos del pánico y permite tener en cuenta reacciones no esperadas durante el proceso de evacuación, al activar zonas que no deberían evacuarse en ese momento. Simula reacciones debidas a amenazas físicas procedentes del volcán y su propagación, teniendo como eje la distancia al volcán; también simula reacciones psicosociales, como es la autoevacuación por proximidad a áreas que están siendo evacuadas, o de forma aleatoria a medida que la alarma se difunde en los medios de comunicación o rumores.



Figura 28: A medida que aumenta el número de afectados, la gestión de la emergencia requiere mayor organización. La imagen muestra la complejidad del Centro de Atención instalado en un polideportivo durante la gestión del terremoto del 6 de abril de 2009 en la región de Abruzzo. (Foto Protección Civil. Italia)

En la zona de estudio del volcán Teide las personas no están acostumbradas a evacuaciones preventivas, debido a los periodos de retorno tan amplios que muestra la actividad volcánica. En otros fenómenos naturales o antrópicos, riadas, incendios forestales, que hayan requerido la adopción de este tipo de medidas, el fenómeno ha sido claramente perceptible y la evacuación fácilmente asumible. Al ser una isla, los lugares a los que poder dirigirse no están suficientemente alejados del peligro volcánico que les amenaza, por lo tanto, es complicado establecer un patrón de comportamiento razonable cuando no se dispone de datos que puedan evaluar el comportamiento esperado. Sólo puede especularse a partir de situaciones similares que se hayan producido en otras partes del mundo y mediante una evaluación de la situación actual en Tenerife: una población que nunca ha sido educada en el fenómeno volcánico que jamás ha hecho simulacros y, además, desconoce totalmente cualquier Plan de Emergencia y Evacuación.

En otras zonas volcánicas, como puede ser el área del Vesubio (Italia), donde existen evidencias claras de su potencial destructivo y en los volcanes mexicanos Chichón y Popocatépetl, donde la actividad volcánica es más persistente y se ha manifestado en fecha reciente, las autoridades y la población están familiarizados con las evacuaciones, no sólo debido a los volcanes sino también a otros fenómenos naturales de gran intensidad que les afectan casi anualmente. La fórmula que se ha adoptado en México para gestionar este tipo de situaciones ha sido mediante el desarrollo de Planes de Evacuación dirigidos directamente por

las Instituciones Gubernamentales, donde la intervención del Ejército juega un papel fundamental cuando el número de personas a evacuar es considerable.



Figura 29: Durante una evacuación es necesario que la población recupere la normalidad lo antes posible. El funcionamiento de las escuelas para los evacuados es una de estas prioridades. La imagen recoge una escuela en una tienda de campaña utilizada en la atención de los afectados por el terremoto de Abruzzo de 6 de abril de 2009. (Foto Protección Civil. Italia)

En cualquier caso, es habitual que las alertas tempranas que se dan para la actividad volcánica permitan prepararse, con la suficiente antelación, a las personas que están expuestas a la amenaza, aunque la certeza del impacto sólo se pueda tener pocas horas antes. Además, es una alerta que afecta a toda la población y, aunque en algunos casos las personas pueden decidir quedarse, no es habitual que adopten esta decisión, pero no siempre en el momento que deben. Por tanto, los tiempos de reacción pueden estar condicionados por el momento en el que se da la alerta, por la actividad sentida del volcán, por la experiencia que la población posea ante este tipo de situaciones y otros condicionantes, lo que retrasará en mayor o menor medida el proceso de evacuación, pero no afectará a la decisión de quedarse o no en su lugar de residencia, aspecto que se considera fundamental en los modelos de evacuaciones de huracanes para poder estimar la sobrecarga de vehículos en las grandes autopistas.

1.5.1.1 Resultados de las encuestas para huracanes.

En los estudios realizados para huracanes (Mei, 2002), los individuos son más proclives a pensar que, si se quedan en sus viviendas, tienen más posibilidades de verse seriamente afectados que si evacúan. Aquellas personas que viven en casas de escasa consistencia, evacúan más rápidamente que las que viven en casas más sólidas. Las mujeres también son más proclives a evacuar que los hombres, y las personas jóvenes más que las mayores. El

problema, como señala el propio autor es que, algunas variables son muy inestables y difíciles de pronosticar, como puede ser la percepción del riesgo. Sería más fácil analizar o tener en cuenta el tamaño de la vivienda, nivel de estudios, raza o nivel económico y considera más viable tener presente la intensidad del fenómeno natural, su trayectoria y velocidad, como factores que ayudan de forma más eficiente a pronosticar el número final de evacuados. Algunos de los parámetros que indica como más significativos para que la gente evacue son:

- Se ha dado una orden oficial de evacuación
- Se posee coche
- La percepción del riesgo es mayor
- Existe un plan de evacuación familiar
- Los vecinos evacúan.

A medida que el nivel de estudio se incrementa, las probabilidades de evacuar también aumentan y si hay animales o mascotas, se reduce.

1.5.2 Tiempo de movilización

El espacio de tiempo que pasa desde que se da oficialmente la orden o recomendación de evacuación hasta que el evacuado se pone en marcha se conoce como *tiempo de movilización*. Una de las principales diferencias que encontramos entre las evacuaciones que se realizan para los huracanes de la zona sur de Estados Unidos y las que se llevan a cabo en zonas volcánicas, es que en los huracanes en esa zona, se producen autoevacuaciones, mientras que para los volcanes suelen ser evacuaciones dirigidas en las que un contingente importante de la población se pone en manos de las autoridades (Valdés-González et al., 2001). Este aspecto condiciona notablemente la forma en la que entendemos el *tiempo de movilización*; en el primer caso, se recomienda evacuar, cada persona utiliza sus propios medios y necesita un tiempo determinado para estar preparada, sin que ello dependa de nadie más, en el segundo, la orden de evacuación implica un momento y un lugar en el que se tiene que estar ya preparado y listo para ser evacuado, como es lógico, su eficacia depende también de la práctica y del conocimiento que las personas tienen de los Planes de Emergencia. Hay que señalar que, como consecuencia de los problemas de gestión que puso de manifiesto el huracán Katrina en el sur de Estados Unidos, este modelo de autoevacuación está siendo revisado en la actualidad (Margulis, 2006).

Para los procesos de evacuación dirigida, la hora y día en que se da la orden es importante para evaluar el tiempo que tarda la población en estar lista para evacuar. La mayoría de personas que se encuentren fuera de casa, retornarán a ella antes de evacuar; si se da la alerta durante el día en periodo laboral, habrá que establecer una ventana temporal de espera más amplia para el inicio del proceso de evacuación que si se hiciera en fin de semana.

Los primeros modelos utilizados para evacuaciones ante huracanes (Mei, 2002) generaban todos los viajes al mismo tiempo, provocando una sobrecarga en la red viaria. Sin embargo, lo más natural es que en una autoevacuación la incorporación se vaya haciendo poco a poco,

como revelan los datos de las encuestas. Esto quiere decir, que las rutas de entrada deberán seguir abiertas varias horas después de haber dado la alerta y que no se puede llevar a cabo ninguna acción de reducción de carriles o cambios en la circulación habitual hasta varias horas después. Por supuesto, esta posibilidad de elección de ventana temporal de retardo está condicionada al tiempo disponible en función del pronóstico dado; cuanto más amplio sea, con más calma se podrá llevar a cabo la operación, cuanto más ajustado, las decisiones serán tomadas con menos tiempo. En este sentido, es muy probable que una evacuación con un pronóstico muy justo en tiempo, requiera la ayuda externa en el transporte para asegurar su efectividad y evitar así el bloqueo de las vías de comunicación (Margulis, 2006). Otro aspecto importante, para el caso de los huracanes es que, en el momento de dar la orden de evacuación, suele estimarse en un 10 % el total de personas que ya han evacuado (Mei, 2002).

El modelo desarrollado en este trabajo permite trabajar ambas formas de evacuación mediante la variación de determinados parámetros y el diseño de zonas específicas. De hecho, los escenarios desarrollados para las zonas de estudio escogidas cubren ambas situaciones. Los volcanes mexicanos, donde es habitual la intervención estatal para llevar a cabo las evacuaciones y el volcán Teide, en Tenerife, donde, hasta ahora, no se conoce un Plan de Emergencia dirigido que contemple una evacuación masiva, siendo muy probable una autoevacuación, dadas las características de la población y su respuesta estimada frente a un incremento perceptible de la actividad volcánica.

Ambas situaciones implican tiempos de movilización distintos, por el simple hecho de que el momento inicial que se considera no es el mismo en un caso que en otro. En las evacuaciones dirigidas, la orden se da con antelación al momento en el que se llevará a cabo la acción, así que la simulación comienza cuando la población, teóricamente, ya debe estar preparada, además todos salen más o menos al mismo tiempo o en un relativo corto espacio de tiempo en vehículos de transporte especiales. En los escenarios de autoevacuación ante un volcán en crisis, el funcionamiento será similar al observado en las zonas de huracanes, la rapidez en la preparación estará también muy condicionada por el comportamiento del volcán en esos momentos. Si el incremento de la actividad se detecta a nivel instrumental pero no es sentido por la población, los tiempos de inicio del viaje serán más lentos, e incluso habrá muchas personas que podrán negarse a evacuar. Por el contrario, si los síntomas son percibidos por la población, estos tiempos se reducirán notablemente e incluso muchas personas autoevacuarán mucho antes, sobre todo si tienen disponibles segundas residencias o casas de familiares suficientemente alejadas del área de riesgo que les permita sentirse más seguras.

1.5.3 Tiempo de viaje

Es el tiempo que necesita una persona desde que empieza a evacuar hasta que llega a un destino seguro y está relacionado, entre otros factores, con la distancia a recorrer, el nivel de congestión del tráfico y la capacidad de la red de comunicaciones. Este tiempo no es habitual que se calcule de forma directa por los simuladores de evacuaciones, salvo en los modelos que trabajan a escala de detalle y simulan el desplazamiento de vehículos a nivel individual. Lo normal es estimarlo indirectamente a partir del tiempo total necesario para completar el proceso de evacuación y de la situación de la red de transportes.

Aunque no se ha planteado como objetivo específico, en el modelo desarrollado pueden obtenerse simulaciones aproximadas del *tiempo de viaje* sin congestión de tráfico, mediante la utilización del modo *test*. Este modo de trabajo permite realizar una evacuación, desde un punto determinado y con el número de personas que se desee, recorriendo la distancia a la salida sin la intervención del resto de evacuados.

1.5.4 Tiempo de evacuación

Este aspecto hace referencia al tiempo necesario para evacuar completamente un área determinada, contando desde el momento que se da la orden de evacuación. La mayoría de modelos de evacuación calculan este valor (Mei, 2002).

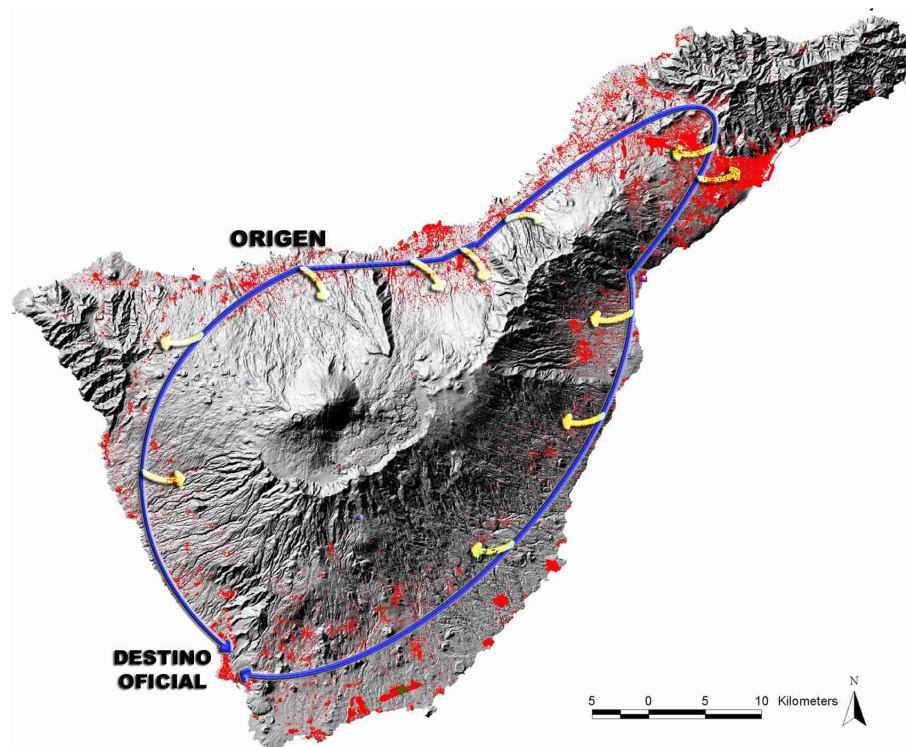


Figura 30.: En una isla como Tenerife puede organizarse una autoevacuación (en azul) cuyo destino esté situado en las infraestructuras hoteleras del sur de la isla. Las personas pueden optar por otros destinos en función del lugar en el que se encuentren sus familiares, segundas residencias, etc, (en amarillo), pero la ruta principal a seguir es la misma.

Dadas las características de la gestión del riesgo volcánico, una de las actuaciones fundamentales consiste en la evacuación de toda la población residente en la zona de impacto para desplazarla, en el menor tiempo posible, hacia los puntos de acogida primarios. Posteriormente se realizan otras actuaciones. Por este motivo, en este trabajo se ha

considerado importante la estimación del tiempo de evacuación, buscando sobre todo la posibilidad de reducirlo mediante la modelización de diversas estrategias de evacuación.

1.5.5 Número de viajes generados y lugares de destino

Los modelos basados en la demanda de viajes –número de viajes generados en espacio y tiempo- han incorporado el análisis de los posibles destinos a partir de la zona denominada segura. Muchos de estos modelos se han llevado a cabo para huracanes, en la zona sur de Estados Unidos y pueden tener en cuenta incluso la capacidad de los hoteles o moteles situados próximos a las autopistas. Con la incorporación de los datos obtenidos en encuestas realizadas a partir de los años 80, se han podido evaluar factores relacionados con el comportamiento y la toma de decisiones de las personas afectadas, aspectos clave para determinar el número de viajes que pueden generarse (Mei, 2002). Dado que estos fenómenos naturales suelen ser de duración relativamente corta, salvo casos extraordinarios, por ejemplo los efectos del huracán Katrina, que inundaron gran parte de Nueva Orleans durante bastante tiempo, las casas de los familiares son, generalmente, uno de los principales puntos de destino. Por ello, el grado de dispersión es mayor, al igual que las rutas utilizadas, aspecto que complica los modelos finales. El segundo lugar utilizado como destino son los pequeños hoteles o moteles situados en zonas de fácil acceso, generalmente a lo largo de las autopistas.



Figura 31: Campamentos de caravanas en las que se alojó a los evacuados durante la crisis bradisísmica de la caldera de Campi Flegrei, Italia, 1983-1985. Los evacuados vivieron durante casi tres años en estas condiciones (Foto R. Ortiz, 1984)

El problema en el caso de crisis volcánica, es que el periodo preeruptivo puede durar bastantes días, incluso años como ya ha pasado en la erupción de Rabaul en Papua Nueva Guinea (Aysan y Davis, 1993), y, si se produce la erupción, hay una gran posibilidad de que la zona quede totalmente destruida, con lo que las posibilidades de retorno son muy complicadas seguramente durante muchos años. También es probable que las viviendas de los familiares puedan usarse para cortos periodos de tiempo, pero no durante largos periodos, al igual que ocurre con los refugios temporales (Baxter et al., 2008a). Por ello, el modelo desarrollado en este trabajo no tiene en cuenta los lugares finales de destino, sino las rutas de salida existentes: se asumen todas las posibles rutas de salida que se podrían tomar en función del destino final, descartando aquellas que se dirijan en una dirección opuesta, salvo que se decida habilitarlas por cuestiones operativas. En caso de requerir vehículos especiales, se pueden reservar vías específicas. Los responsables de la evacuación deberán preparar centros de acogida temporales de los evacuados y dar alojamiento provisional a muchos de ellos hasta que se les asigne un lugar de residencia definitiva durante el tiempo que dure la evacuación que puede ser indefinida. Otro elemento a tener en cuenta es que el simulador de evacuaciones no representa el movimiento del tráfico, tal como hacen otros, sino el desplazamiento de personas; la capacidad de la vía actúa como un parámetro de control del número máximo de personas que pueden estar en un lugar y tiempo dado y está en función de las características de la vía y el tipo de evacuación, si es dirigida o en vehículo propio. También, se asume que la zona debe ser evacuada en su totalidad, por tanto, todas las personas, en un momento u otro, tengan medios para hacerlo ellas mismas o no, deben abandonarla; en el caso de los modelos para huracanes, la decisión de abandonar la vivienda depende del individuo y puede estar condicionada por multitud de parámetros, por eso las encuestas realizadas son fundamentales para estimar el número potencial de vehículos que se pueden poner en movimiento y en qué momento.

En base a los estudios de huracanes, la determinación de las zonas de mayor riesgo y el nivel de renta parecen ser las mejores herramientas de predicción para determinar el número de personas que usarán los refugios públicos. Las personas que viven en las zonas de mayor riesgo o las más pobres suelen usar más los refugios públicos que las que viven más alejadas o tienen más recursos económicos (Mei, 2002). Este aspecto no se considera en el modelo desarrollado, salvo la capacidad de acogida inmediata en el punto de salida de evacuación que funcionaría como *check point*.

1.5.6 Elección de las rutas de escape

Otra cuestión que parece ser determinante en los procesos de autoevacuación es el comportamiento del conductor en lo que respecta a la elección de la ruta a seguir. Generalmente, los conductores se dirigen de forma habitual al mismo lugar, pero no siempre utilizan la misma ruta, sino que optan por caminos secundarios en función de las condiciones del tráfico (Barrett et al., 2000). Hay que destacar que, en muchos modelos, solo se trabaja con las principales vías de comunicación, aspecto que simplifica notablemente el algoritmo de cálculo para simular el flujo de tráfico.

En nuestro modelo se consideran todas las vías de comunicación disponibles, independientemente de la escala de análisis, aspecto muy importante, especialmente en aquellas zonas donde predomina el poblamiento disperso. También, las elecciones de ruta se simulan en función del orden y clasificación con la que se introducen los datos, teniendo en cuenta que, una vez establecidas, permanecen inamovibles para un mismo punto, independientemente del número de personas que residan en él. El programa prioriza, en función de la proximidad al punto de salida, todas las rutas contenidas en una *zona* (todas las vías contenidas dentro de un polígono). La definición de *zona* la realiza el operador de forma manual, pudiendo abarcar desde toda el área de trabajo, hasta pequeños espacios. Cuanto más se detalle este aspecto, más controlado y dirigido estará el proceso de selección de rutas.

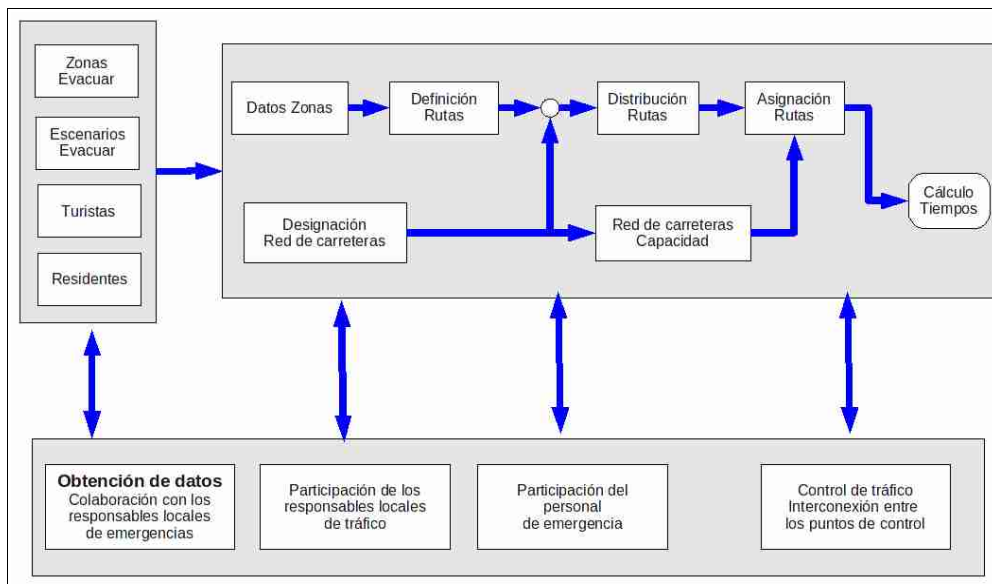


Figura 32: Diagrama utilizado para la planificación de evacuaciones, donde se destaca la necesidad de coordinación con los agentes locales.

Hay que tener en cuenta la posibilidad de que un alto porcentaje de conductores elijan rutas secundarias de escape a partir de caminos alternativos, incluso pistas forestales, si se encuentran una situación de tráfico demasiado denso. De hecho, en una isla como Tenerife, sería necesario utilizar varias rutas de forma simultánea para descargar la vía principal que circunda la isla. Por supuesto, la capacidad de elección de una ruta u otra por parte del conductor está ligada al conocimiento que tenga de la carretera y al tipo de vehículo que posea (puede circular por pistas forestales). Si determinamos una autoevacuación, donde las personas utilizan su propio vehículo, se pueden dar casos de elecciones alternativas a las fijadas por las autoridades para salir de la zona, pues los destinos son conocidos por todos. En el caso de una evacuación en la que las autoridades ponen los vehículos, las rutas seleccionadas de entrada y salida serán las más comunes y fáciles, pues los conductores suelen ser profesionales de los servicios de emergencia ajenos a la zona y, por tanto, desconocen todo el entramado viario; también debemos tener en cuenta que, en este caso, la densidad de tráfico

es muchísimo menor y, por tanto, los atascos no deberían producirse. En general, los simuladores que permiten la elección libre de la ruta por parte del evacuado, obtienen tiempos de vaciado mucho mayores que cuando se puede optimizar mediante el control total del proceso, sin embargo, ambas opciones siempre deben contemplarse.

1.5.7 Gestión de las intersecciones o cruces viarios

Muchos de los modelos desarrollados intentan recrear las condiciones de tráfico lo más fielmente posible, especialmente aquellos que trabajan a escalas grandes con mucho detalle, destacando la gestión de las intersecciones o cruces como uno de los elementos principales (Cova y Johnson, 2003). Entender y modelizar la circulación del tráfico en estos puntos conflictivos es vital para poder establecer cálculos temporales adecuados para una evacuación, independientemente de si son controladas y dirigidas o no. Poder distinguir entre ambas y obtener información al respecto podría ayudar bastante en la planificación final. En nuestro caso, lo que se busca no es tanto la gestión correcta de las intersecciones, sino el comportamiento de las mismas para determinar donde se producirán los mayores atascos y, por tanto, realizar una planificación más adecuada a la hora de diseñar los planes de evacuación.

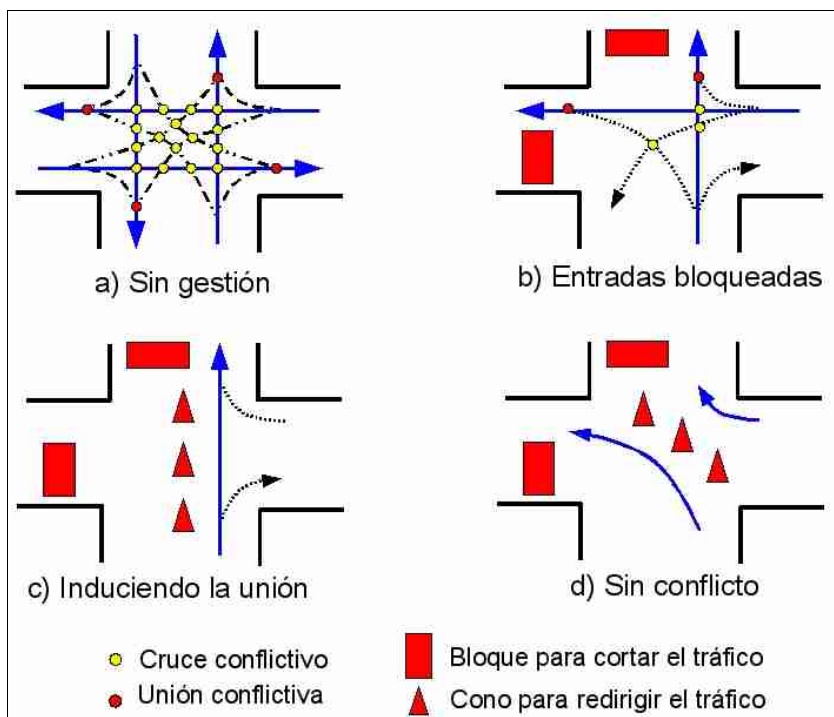


Figura 33.: Estrategias para reducir los conflictos en los cruces. La situación d sería la ideal, en la que puede establecerse un flujo continuo. Analizando las características del cruce, puede incluirse en los Planes de Emergencia la gestión más adecuada del mismo (Modificado en Cova y Johnson, 2003)

1.5.8 Punto de partida

En la mayoría de la bibliografía relacionada con los modelos de evacuación, se asume como punto de partida el domicilio familiar. Independientemente de la hora a la que se de la alerta, todo el mundo regresa primero a su casa a prepararse y organizar su evacuación y luego comienza el trayecto desde ese punto. Sin embargo, la simplificación de la red de comunicaciones o el establecimientos a nivel de simulación de puntos únicos de salida, provoca que los *tiempos de preparación* deban considerarse separadamente. En nuestro caso, también tenemos en cuenta este factor, los trayectos o actividades que se realicen en las fases previas a la llegada al domicilio familiar se insertan en la función que calcula el tiempo de incorporación, que variará según a la hora del día a la que se de la alerta. Dependiendo de la escala de análisis utilizada, podemos fijar como punto de partida el domicilio, el barrio, el poblado, etc.

Más importante, si cabe, es la zonificación que se establece para determinar que áreas están más expuestas y, por tanto, darán lugar a un mayor número de evacuados y a que ritmo. En el caso de los huracanes, la zonificación de zonas urbanas se realiza a partir de numerosos elementos; tipología de las viviendas en relación a su resistencia a las tormentas, proximidad a ríos que puedan desbordarse, nivel económico, etc. (Post, 1999). La zonificación es un criterio que también se tiene en cuenta en el modelo de evacuación desarrollado en este trabajo, pero no para determinar el volumen de personas que evacuan, sino para poder organizar mejor el proceso, dado que se asume que todos deben abandonar el área potencial de impacto.

CAPITULO 2

Metodología

2 Metodología

2.1 Introducción

En este capítulo se presentan los dos apartados en que se divide el modelo de evacuación propuesto, junto a una serie de consideraciones de carácter general sobre la problemática del comportamiento de la población frente a situaciones de emergencia y su implicación para el diseño de escenarios de evacuación. El primer apartado se centra en el tratamiento y diseño de la estructura de datos espaciales necesarios y el segundo en el desarrollo de una herramienta software para la modelización y análisis de evacuaciones en situaciones de crisis volcánica. Como ocurre en la mayoría de modelos, la calidad de los datos es fundamental para que los resultados sean lo más satisfactorios posibles, por ello, es importante conocer muy bien el estado en que se encuentra la información que se vierte en el sistema. En muchos casos, es conveniente diseñar un test para verificar la calidad de los datos; un ejemplo típico puede ser los *sumideros* que aparecen en los Modelos Digitales de Elevación del Terreno (*DEM*), puntos aislados con altitud cero o negativa, discordante en relación a su entorno, presentes como resultado de la interpolación durante el proceso de cálculo.

Actualmente, las instituciones públicas están poniendo en Internet y de forma gratuita, la cartografía digital básica, temática y ortofotos de que disponen, facilitando su acceso. Un computador de gama baja y una conexión a Internet es todo lo necesario para acceder a este material. Lo que sigue resultando complicado es el acceso a las bases de datos con la información administrativa necesaria para la gestión de una crisis volcánica, incluyendo la valoración del riesgo y la planificación de una evacuación. Como ejemplo de este tipo de datos se puede citar la distribución de la población por su lugar de residencia, a escalas de detalle, el parque móvil, actividades empresariales, etc.

En el modelo desarrollado en este trabajo se requiere conocer la distribución de la población a evacuar, la red viaria y el estado en que se encuentra, los medios de transporte disponibles y su localización. Además, es importante conocer las vulnerabilidades de la red de comunicaciones ante los peligros volcánicos y asociados, pues puede verse gravemente afectada desde el comienzo de la crisis. La inclusión de estos factores requiere disponer del modelo digital del terreno, ortofotos y cartografía específica (por ejemplo: geológica, geotécnica, etc.).

También deberá tenerse en cuenta el comportamiento esperado de la población ante una situación de emergencia, muy variable en función del grado de preparación que posea, su experiencia, nivel de desarrollo económico, etc. Este comportamiento es una pieza clave para estimar los *tiempos de preparación* para la evacuación y es modelado mediante funciones de distribución. Lamentablemente, no existen suficientes datos experimentales referentes al comportamiento de la población en situaciones de emergencia mayor. Salvo que se realicen

campañas educativas y estudios psicológicos de la población, los parámetros requeridos por estas funciones tendrán que simplificarse introduciendo valores estimados.

Mientras que las cartografías digitales cada vez tienen mayor resolución y gran calidad, en el caso de las bases de datos ocurre al contrario; cuanto más detalle tienen, más errores suelen contener, muchos de ellos derivados de la falta de actualización o de la simple gestión administrativa, por lo que se deberán utilizar con mucha cautela.

Aspectos como la vulnerabilidad sísmica para eventos de baja intensidad, estabilidad de taludes, muros y edificios en mal estado, no están contemplados habitualmente y requieren trabajo de campo, proceso que necesita de un protocolo de actuación que permita la actualización constante de los datos, si se quiere mantener la calidad de los mismos a lo largo del tiempo.

2.2 Escenarios para la gestión de crisis volcánicas

Una herramienta muy útil para la gestión de las crisis volcánicas es la generación de escenarios, cuyo objetivo principal es proporcionar una visión aproximada de los distintos efectos que puede tener una erupción en un entorno dado y de las posibles estrategias a adoptar para mitigar su efecto. En la gestión de crisis volcánicas se pueden distinguir tres grandes grupos de escenarios¹:

- Los que muestran el comportamiento del fenómeno volcánico, bien de forma parcial, centrados en alguno de los elementos de peligro inherentes al proceso natural, o bien de forma combinada, sumando todos los elementos de peligrosidad con el fin de obtener una visión total del impacto.
- Los que representan el grado de destrucción potencial que podrían sufrir las infraestructuras y el entorno socio-económico de la comunidad que reside en las proximidades del volcán, de acuerdo a su vulnerabilidad y exposición. Al igual que los anteriores, pueden ser parciales o globales, según evalúen por separado o conjuntamente los efectos de los peligros asociados a la actividad volcánica.
- Los que muestran las diversas estrategias que se pueden adoptar para mitigar los efectos del fenómeno natural, entre ellas las evacuaciones. Estos escenarios dependen, no sólo de la actividad del volcán, sino también del comportamiento y características socio-económicas de la población.

Otro aspecto importante de los escenarios depende del uso al que están destinados. En periodos de calma del volcán, los escenarios que se desarrollan son generales y el objetivo principal es ayudar en la Ordenación del Territorio. Según el desarrollo socio-económico alcanzado y la planificación que se haya seguido, podrán tener mayor o menor grado de utilidad, aunque siempre evitarán cometer graves errores en el planeamiento futuro y poner de

¹ Esta sistemática deriva de las conversaciones mantenidas con S. de la Cruz-Reyna y R. Ortiz sobre las características y utilidad de los escenarios.

relieve los actuales. Igualmente, son una herramienta fundamental para establecer las pautas de los Planes de Emergencia, generales o específicos, que se desarrollen para un área.

Por el contrario, durante la fase de crisis adquieren un carácter evolutivo, se construyen a partir de la interpretación de los datos proporcionados por la red de vigilancia y en función del pronóstico de evolución de la actividad del volcán, antes de la erupción o incluso durante ella. Esto permite a los gestores tener una visión aproximada del impacto esperado, ayudando en la toma de decisiones con el fin de minimizar sus consecuencias.

Para manejar estas herramientas hay que tener un conocimiento, no sólo del fenómeno volcánico en general, sino también del entorno socio-económico de la zona en que se trabaja. Hay tres elementos claves que marcan profundas diferencias a la hora de valorar los escenarios propuestos y que condicionan las estrategias finales que se adopten para la mitigación del riesgo: las dimensiones del área de susceptibilidad para los centros de emisión, la frecuencia con que se repiten los distintos tipos de erupciones y el comportamiento esperado de la población.

En el primer caso, un área extensa hace más complejo y delicado el manejo de los escenarios, especialmente, si no es posible determinar el centro emisor hasta los momentos previos a la erupción. Las áreas donde el volcanismo predominante es de tipo monogenético resultan más complejas de evaluar al no conocer el punto de emisión; las áreas de susceptibilidad son más amplias y, como consecuencia, también el resto de escenarios posibles. No se podrá acotar el punto de emisión hasta entrar en una fase donde la actividad sea lo suficientemente relevante para establecer, de forma aproximada, su ubicación. En general, en este tipo de volcanismo los precursores se identifican con muy poco tiempo de antelación. Por el contrario, en los grandes estratovolcanes, el área de susceptibilidad está más definida, la zona de impacto suele ser mucho mayor y los precursores se identifican con mucho tiempo de antelación, especialmente en el caso de grandes erupciones. Sin embargo, la lentitud con la que evolucionan hace que la población y sus responsables políticos se habitúen a esa situación y no tomen las medidas adecuadas, por lo que la erupción suele presentarse en un corto plazo de tiempo, a pesar de haber estado durante años mostrando una actividad anómala.

En el segundo caso, podemos encontrar volcanes con una actividad relativamente frecuente, incluso en fecha reciente, o volcanes con largos periodos de retorno y que no han tenido erupciones próximas en el tiempo. La diferencia, desde el punto de vista de la validez de los escenarios, es muy importante pues, en el primer caso, se tiene un conocimiento más exacto del comportamiento del volcán, mientras que en el segundo se desconoce su pauta. Como ya se ha indicado, la actividad volcánica, a diferencia de otros fenómenos naturales de gran intensidad, posee una fase previa que puede llegar a prolongarse durante decenas de años antes de entrar en erupción, aunque la fase final de aceleración de la actividad antes del impacto puede reducirse a menos de 48 horas (Ortiz et al., 2003). Las técnicas de instrumentación actuales permiten realizar un seguimiento de la misma y dar alertas tempranas pero, sobre todo, aportan datos que permiten desarrollar escenarios más aproximados y acordes con la actividad que muestra el volcán. Por el contrario, en los volcanes donde no existe un

seguimiento instrumental de erupciones en fechas recientes, es muy difícil pronosticar su comportamiento, teniendo que asumir que será similar al de otro volcán del mismo tipo. Esta situación requiere una consideración distinta de los escenarios, pues su grado de incertidumbre es mucho mayor, siendo conveniente tomar como partida escenarios correspondientes a una actividad eruptiva de mayor magnitud, acorde al VEI que pueda alcanzar el volcán, y actuar de forma sobredimensionada. El conocimiento del árbol de eventos permite definir los escenarios más probables y, en muchos casos, acotar el VEI máximo esperado.

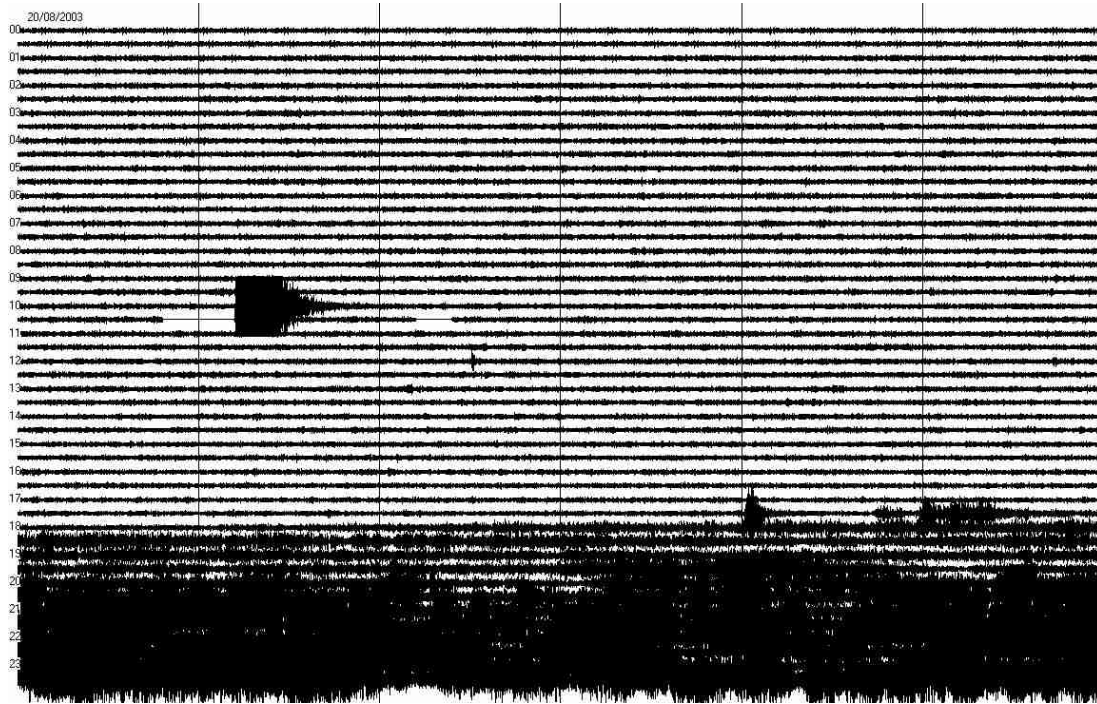


Figura 34: Erupción del volcán Tungurahua, Ecuador, en 2003 disparada por un sismo ocurrido horas antes. Intercambio Científico Dep. Volcanología CSIC – Instituto Geofísico de Ecuador.

En el caso de simulación de evacuaciones, uno de los aspectos que genera mayor grado de incertidumbre es el comportamiento esperado de la población. Cuando no hay experiencia previa, sólo se puede realizar una aproximación, introduciendo una serie de elementos que caractericen el comportamiento que pueda tener la comunidad ante una situación de emergencia. La calidad de los posibles escenarios que puedan calcularse con el modelo de evacuación, no depende únicamente del nivel de detalle que tengan los datos cartográficos y bases de datos, sino también del conocimiento que se tenga de la reacción de la población.

Las áreas de estudio utilizadas para la aplicación de este modelo están tratadas a escalas diferentes; áreas con mucho detalle, como es el caso del municipio de Icod de los Vinos, Tenerife, España, donde la población a evacuar lo hace desde su lugar de residencia, mientras que para los volcanes Chichón y Popocatépetl, México, se utiliza el núcleo (capital de municipio, pueblo, poblado, etc...) como lugar de salida.

Los escenarios posibles que pueden llegar a simularse son múltiples, en función de la configuración de los datos iniciales²:

- *Autoevacuación sin control.* Se autoevacua toda el área al mismo tiempo, no hay ningún control de tráfico ni dirección de salida específica. Se asignan múltiples puntos de salida y se simula que la población elige la que considera mejor vía de escape.
- *Autoevacuación semicontrolada.* Igual que la anterior pero se controlan los cruces mediante la zonificación del área y se establecen los puntos de salida más probables.
- *Autoevacuación por zonas sin pánico.* El área se divide en zonas que serán evacuadas siguiendo un orden preestablecido y se definen rutas de salida para cada zona.
- *Autoevacuación por zonas con pánico.* Igual que la anterior pero cuando la primera zona empieza a ser evacuada, el resto se van incorporando precipitadamente debido al pánico que hace que la gente no quiera esperar su turno.
- *Evacuación dirigida sin pánico.* Se diseñan zonas más pequeñas en las que se introducen puntos de reunión a los que se llega a pie. Desde allí, los habitantes son transportados en vehículos proporcionados por los responsables de la evacuación, siguiendo rutas preestablecidas.
- *Evacuación dirigida con pánico.* Igual que la anterior pero incorporando zonas que teóricamente no deberían ser evacuadas en ese momento.

En cada uno de estos escenarios pueden establecerse unos tiempos de espera que varían en función de las características de la población, la hora a la que se da el orden, etc. Estos tiempos de espera están controlados por la *función de comportamiento*, que se desarrolla en el punto 2.7.2 y que puede variar en función de la zona seleccionada. Los tiempos cortos se asignan a evacuaciones dirigidas, con una alerta previa al momento de evacuación y una población preparada que conoce el plan de evacuación. Los tiempos más largos se asignan a poblaciones con menor preparación.

Las modificaciones en velocidad y capacidad de las vías de comunicación permite simular la utilización de transporte colectivo, incrementando la primera y reduciendo la segunda, transporte privado, con valores reales, si se dispone de ellos, o el desplazamiento a pie. Cuando se utiliza el transporte colectivo, los atascos no deberían ser un factor crítico dado que hay menos vehículos circulando, aunque lo realizan en convoy a baja velocidad.

La zonificación se utiliza para dirigir la evacuación hacia los puntos de salida, puntos de reunión o cualquier punto que se considere adecuado. Pueden crearse tantas zonas como se crea oportuno, controlando el nivel de organización que se le da a la evacuación. En este caso utilizamos dos grupos de zonas distintos, el primero dirige la evacuación hacia un único punto de salida, situado en la vía principal de comunicación del municipio. El segundo grupo, redirige la evacuación hacia la vía de comunicación más próxima que salga del área de

² Algunos de los escenarios han sido propuestos por C. Dueñas, Protección Civil de España, y S. de la Cruz-Reyna, Instituto de Geofísica de la UNAM.

impacto. El primer supuesto es utilizado para evacuaciones dirigidas, el segundo para espontáneas.

La función *pánico* permite activar la autoevacuación o evacuación dirigida de zonas que teóricamente no debieran ser evacuadas o lo serían con posterioridad, siguiendo un orden preestablecido. Esta función representa el tiempo estimado necesario para difundir un rumor, que puede ser de horas o minutos. Está basada en casos reales donde algunos núcleos de población han evacuado porque vieron que sus vecinos lo hacían y pensaron que luego les tocaría a ellos o sencillamente por pánico.

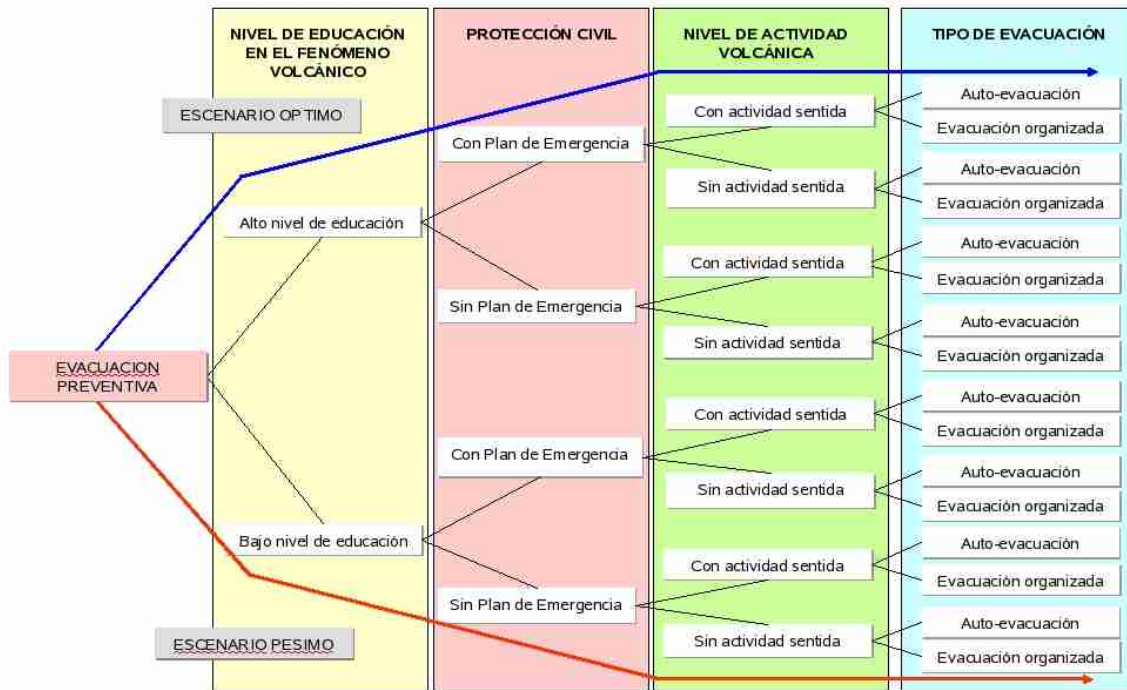


Figura 35: Factores a tener en cuenta para el diseño de escenarios de evacuación (Marrero et al., 2008).

En los escenarios propuestos se contempla siempre el total de la población, sin embargo, según la hora del día a la que se de la alerta, una parte importante de los habitantes estarán alejados de sus viviendas, especialmente en ciudades dormitorio. En este caso, habría que contemplar un flujo de personas que intentarían ir a recoger a sus familiares o enseres. Estas circunstancias no plantean problemas para la simulación, pero es muy difícil disponer de las bases de datos que las reflejen. Una solución de compromiso consiste en introducir una aproximación estadística, reducir la población en un factor y repartirla en función de los tramos y tipología de las zonas de residencia. Paralelamente, pueden incrementarse los *tiempos de preparación* según se estime oportuno. Si se quiere evacuar un entorno laboral, hay que tener en cuenta que los tiempo de respuesta son mucho más cortos para las personas que están en un lugar de trabajo que para aquéllas que están en sus casas. Otro aspecto a considerar

es el referente al estado inicial de las vías de comunicación: totalmente disponibles para la evacuación o con tráfico normal para ese día y hora.

2.2.1 Percepción del riesgo y definición de escenarios

El desastre ocurrido como consecuencia de la erupción del Nevado de Ruiz, Colombia, 1985, (Voight, 1990) puso de manifiesto la desconexión existente entre los avisos emitidos por Protección Civil y la forma en que la población interpretó esta información. Desde seis meses antes, el volcán estaba sometido a una intensa vigilancia y estudio por parte del Instituto Nacional de Geología y Minería de Colombia (INGEOMINAS), apoyados por expertos internacionales y se habían elaborado los mapas de peligrosidad. El día de la erupción se dieron dos avisos (a las 16 y 19 horas), con la suficiente antelación para que la población de Armero pudiera evacuar el pueblo, que fue destruido a las 23 horas provocando la muerte de más de 20000 personas. A raíz de este suceso, Naciones Unidas declaró la Década Internacional para la Mitigación de los Desastres Naturales, 1990-2000 (resolución 44-236 1987) cuyo objetivo era estudiar el mecanismo por el que un fenómeno natural se convierte en un desastre, cambiando la mentalidad con la que se analizan y gestionan las crisis provocadas por fenómenos naturales. Este cambio es especialmente relevante para el riesgo volcánico, siendo uno de sus aspectos más estudiado el comportamiento de la población y la percepción del riesgo, sin embargo, en muchos países con áreas volcánicas activas aún no se ha llevado a cabo este tipo de análisis.



Figura 36: Uno de los programas más ambiciosos de la Década para la Mitigación de los Desastres Naturales, propiciada por Naciones Unidas, fue el de Volcanes de la Década donde se concentró la investigación volcánica durante 10 años. Entre ellos figura el volcán Teide, Tenerife, España. (USGS).

Los resultados de los trabajos de Barberi et al., 2008, Gaillard, 2008, Paton et al., 2008 y Perry y Lindell, 2007, todos ellos referidos a zonas de actividad volcánica reciente, reflejan que una parte importante de la población es consciente del peligro al que está expuesta. Sin

embargo, las medidas que adopta para autoprotegerse y mitigar el riesgo no están directamente relacionadas con el grado de percepción, independientemente de las campañas formativas que se hayan realizado. Los factores que explican este comportamiento varían significativamente de una comunidad a otra, en función de sus características socio-económicas, históricas, educacionales y políticas, haciendo que un modelo que se ha desarrollado para un área concreta sea difícilmente aplicable a otra. Por otra parte, es habitual un escaso contacto entre las comunidades expuestas y las agencias encargadas de la vigilancia y elaboración de los Planes de Emergencia (Berrocal, 2008), generando falta de interés en unos casos, desconfianza en otros, lo que al final reduce el grado de preparación de la población.

Los factores que comúnmente se utilizan para caracterizar el comportamiento más probable de la población ante una situación de emergencia son los siguientes:

- **Memoria histórica:** se relaciona con los acontecimientos pasados que han quedado guardados en la memoria de la comunidad y que son transmitidos a través de generaciones por diversos medios. En las sociedades desarrolladas, el desarraigo familiar hace que la memoria histórica haya desaparecido o tenga muy poca importancia. Esta situación reduce considerablemente el conocimiento del entorno en el que vive el individuo. También, donde la memoria histórica es muy débil o no existe, resulta sumamente fácil manipularla con el fin de generar una idea poco realista del fenómeno volcánico, acorde con los intereses políticos y/o económicos del momento.
- **Experiencia reciente:** Hace referencia a los fenómenos volcánicos ocurridos en el lugar en fechas próximas. Plantea diversos problemas; en un entorno donde la frecuencia del fenómeno es muy elevada y con características similares, la población suele estar muy preparada y además está convencida de ello, sin embargo, el exceso de confianza los convierte en muy vulnerables ante un evento de mayor magnitud.
- **Niveles de educación en riesgo y autoprotección:** La educación no asegura que se incrementen las medidas de autoprotección (Paton et al., 2008), sin embargo puede compensar la falta de memoria histórica y ayudar en la toma de conciencia del entorno y de las amenazas a las que se está expuesto. Una sociedad educada y consciente, en principio, aceptará mejor las medidas destinadas a su protección. En las campañas educativas debe tenerse en cuenta no caer en el paternalismo, mediante el cual las personas declinan la responsabilidad en su autoprotección y la ponen en manos de las autoridades. Es importante señalar que el término educación en los trabajos relacionados con el riesgo, hace siempre referencia a la educación específica en el fenómeno y no debe confundirse con el nivel cultural que posea el individuo. Se han dado casos donde las personas con mayor grado académico presentan respuestas más deficientes.
- **Planes de emergencia, ejercicios y simulacros:** Los Planes de Emergencia son, en general, elaborados por las autoridades sin participación ciudadana. Esto provoca que sean desconocidos por la población y susciten desconfianza hacia las autoridades (Barberi et al., 2008). Su difusión y puesta en práctica mediante la realización de

ejercicios y simulacros, permite compensar o complementar la falta de experiencia reciente en crisis volcánicas. Esta práctica está muy extendida en el ámbito de los riesgos antrópicos como es la energía nuclear o la industria química, pero no frente a los fenómenos naturales.

- **Acceso a información:** Si la población tiene acceso, en un momento dado, al material adecuado relacionado con la autoprotección, puede mejorar su respuesta ante una emergencia. El acceso a la información es una herramienta que compensa la falta de educación y de memoria histórica, especialmente, en aquellas zonas donde existe una percepción alta de las amenazas a las que se está expuesto. Actualmente, es práctica habitual que las agencias u organismos encargados de la gestión de las emergencias utilicen Internet como medio de difusión de toda la información relativa a la mitigación del riesgo (por ejemplo: www.cenapred.unam.mx) y folletos, revistas, carteles, etc. cada vez en menos uso debido al alto coste de producción.

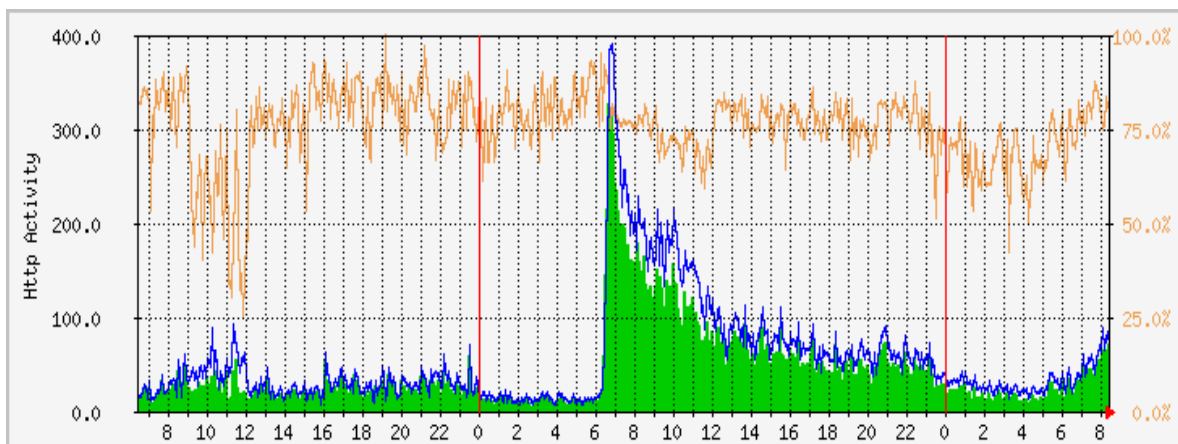


Figura 37: Accesos a la página WEB del USGS Earthquake Hazards para obtener información inmediata sobre un terremoto sentido de magnitud 5, ocurrido en el estado de Washington, USA, el 10 de junio de 2001. Obsérvese el fuerte incremento de accesos inmediatamente después de la ocurrencia del terremoto. Internet es actualmente la primera fuente de información inmediata sobre desastres y se está convirtiendo en una potente herramienta educativa para minimizar sus efectos (<http://bort.caltech.edu/>).

- **Nivel de urbanización:** La población del medio urbano tiende a desligarse del entorno natural que la rodea y las relaciones sociales que se establecen favorecen el desarraigo e infravaloración de las amenazas del medio natural a las que está expuesta la ciudad.
- **Nivel socio-económico:** Ayuda a explicar el comportamiento de la población ante los fenómenos naturales adversos. En el estudio realizado por Gaillard, 2008, muestra que la población se ve forzada a asumir un mayor riesgo debido a las condiciones económicas y a la relativa pobreza pero, en ningún caso, dejan de ser conscientes de los peligros a que están expuestos. Incluso, adoptan las medidas necesarias dentro de sus posibilidades para mitigar el riesgo. La posibilidad de autoevacuación está muy relacionada con la disponibilidad que tenga una comunidad de poseer medios propios

(Houston, 2006). Si se dispone de esta opción, será más fácil evacuar para prevenir, como ocurrió en la primera fase de la erupción del volcán Chichón, México (Macías, 2005). Este factor está estrechamente ligado con el nivel de confianza que se tenga en la Protección Civil y, en general, en los organismos públicos encargados de la gestión de la crisis.

2.3 Tiempos calculados

2.3.1 Tiempo de movilización.

El *tiempo de movilización (TM)* corresponde al tiempo transcurrido desde que los habitantes empiezan a prepararse hasta que inician la evacuación. El proceso se puede iniciar con una alerta oficial o la ocurrencia de un fenómeno en el volcán que provoque una alarma en la población y ésta decida abandonar su lugar de residencia. El tiempo que transcurre desde que se da orden de evacuación o se produce la alarma, hasta que esa información es asimilada por los habitantes y deciden actuar se define como *tiempo de reacción (TR)*. El tiempo que los habitantes necesitan para organizarse, estar listos y abandonar su residencia se define como *tiempo de preparación (TP)*. El intervalo de tiempo que transcurre desde que la población está preparada para evacuar hasta que se incorpora al flujo de la circulación se denomina *tiempo de espera (TE)*. En el modelo de evacuación desarrollado en este trabajo, el *tiempo de reacción* y el *tiempo de preparación* están incluidos en la función de comportamiento de la población. Esta función viene definida por los parámetros *tiempo medio* y *dispersión* correspondientes a una o dos distribuciones normales (función unilobulada o bilobulada), se fija en el fichero de configuración inicial y no puede modificarse durante toda la simulación. Sin embargo, el *tiempo de espera* depende de las condiciones de la circulación en cada punto de la red viaria y en cada tiempo del proceso de evacuación. En las fases iniciales de las simulaciones, cuando las vías de comunicación están libres, o cuando las *retenciones* -circulación lenta más bloqueos-, están por debajo del nivel de saturación de las vías de comunicación, el *tiempo de movilización* sigue el mismo patrón que la función de comportamiento de la población. Por el contrario, en las simulaciones donde se alcanzan *retenciones* importantes, el *tiempo de movilización* se incrementa debido al *tiempo de espera*.

2.3.2 Tiempo de viaje

El modelo desarrollado no permite establecer el *tiempo de viaje* individual, dada la multitud de rutas existentes y la imposibilidad de diferenciar a los habitantes que están situados próximos a las salidas y los que están más lejos. Puede evaluarse en las evacuaciones secuenciales el *tiempo de viaje libre (TVL)*, definido como el tiempo de llegada del primer habitante al punto de salida o llegada contando con todas las vías libres. El tiempo de viaje está condicionado por la distancia a recorrer y la velocidad de circulación instantánea en cada punto de la red viaria. Para evaluar el efecto que tiene la saturación de las vías de comunicación en el *tiempo de viaje (TV)*, se comparan simulaciones con una misma función de comportamiento de la población, con otra de referencia donde las vías de comunicación

poseen una capacidad suficientemente grande para que no se produzcan caídas de velocidad superiores al 10% de la velocidad máxima.

2.3.3 Tiempo de evacuación

El *tiempo de evacuación* es el tiempo necesario para evacuar completamente un área determinada y depende del *tiempo de movilización* y del *tiempo de viaje*, que corresponden a funciones muy complejas dependientes de múltiples parámetros. Aunque para cada individuo el tiempo de evacuación correspondería a la suma de su *tiempo de movilización* más su *tiempo de viaje*, el método empleado no permite este cálculo individualizado por lo que se debe utilizar tiempos globales. Para caracterizar el tiempo que dura el proceso de evacuación, en cada una de las simulaciones, se utiliza el *tiempo de evacuación final* que corresponde al tiempo necesario para evacuar completamente un área. Este tiempo está muy condicionado por los últimos evacuados que llegan al punto de destino, por ello, para caracterizar mejor el tiempo empleado por la mayoría, se considera el *tiempo de evacuación final* cuando se alcanza el 95% de la evacuación. El tiempo medio que invierte la población en evacuar se corresponde con el *tiempo medio de evacuación*, definido como:

$$\bar{t} = \frac{\sum t \cdot (evac(t) - evac(t-dt))}{\sum evac(t)}$$

Donde \bar{t} es el *tiempo medio de evacuación*, t el tiempo transcurrido en la evacuación, $evac(t)$ es el número de evacuados correspondientes al tiempo t y $evac(t-dt)$ el número de evacuados en el instante anterior.

Para establecer el tiempo mínimo de evacuación para una área, debe realizarse una simulación en la que se asignen valores altos de capacidad para todas las vías de comunicación. El objetivo es eliminar la posibilidad de retenciones y obtener un tiempo de evacuación condicionado sólo por el tiempo de preparación y tiempo de viaje a la máxima velocidad que permite la red de comunicaciones.

2.4 Diseño de la estructura de datos

El modelo de evacuación se ha desarrollado para que no dependa de ningún software específico, de esta forma, es fácil adaptarlo a las necesidades y disponibilidades de los distintos usuarios. Las herramientas de edición básicas necesarias pueden encontrarse fácilmente hoy en día en cualquier paquete SIG relativamente evolucionado, incluido los *Open-Source*.

La estructura de datos con la que opera el modelo de evacuación está constituida por una tabla alfanumérica que representa puntos espaciales, equivalentes a la red de comunicaciones, a los que se les ha añadido diversos campos. Esta estructura es la más básica y no requiere formatos específicos, únicamente respetar el orden de las columnas y el tipo de dato utilizado. Además, permite un amplio margen de libertad operativa, tanto en el caso de que se desee añadir nuevos parámetros, como de la elección del software con el que se quiera gestionar; el operador puede seguir utilizando el SIG con el que esté más familiarizado o, incluso, trabajar en cualquier

motor de base de datos externo. Dependiendo de la calidad y del estado en que se encuentren los datos iniciales disponibles, el trabajo será más o menos laborioso para obtener capas de información georreferenciadas, con datos identificativos y campos comunes que permiten su asociación con las bases de datos administrativas.

2.4.1 Cartografía y bases de datos

Una de las principales dificultades que surge a la hora de trabajar con los Sistemas de Información Geográfica (SIG), radica en la cartografía que se utiliza como base que, en la mayoría de los casos, no está pensada para su utilización en el entorno SIG. En general, se elaboran utilizando la mentalidad de dibujo, Diseño Asistido por Computador DAC (más conocido por sus siglas en inglés, CAD (*Computer Aided Design*), sin tener en cuenta la individualidad de los elementos espaciales que representan. Este hecho obliga, en muchos casos, a complicados procesos de reelaboración en los que se pierde mucho tiempo para, finalmente, poder obtener capas de información que puedan utilizarse de forma efectiva en el computador y no como mero soporte visual. La situación de partida puede variar enormemente, desde no disponer prácticamente de información cartográfica digital, hasta poseer redes urbanas complejas con gran nivel de detalle. Por tanto, según sea el caso, los pasos a seguir serán diferentes hasta llegar a las tablas alfanuméricas requeridas. En nuestro caso, para probar la operatividad del modelo de evacuación, se ha seleccionado tres áreas volcánicas activas con características distintas, tanto desde el punto de vista de la escala y disponibilidad de los datos como de las poblaciones residentes.

Aunque en algunos lugares la administración todavía sigue utilizando el papel para registrar a los individuos de una comunidad, el uso de bases de datos digitales está muy extendido. La gestión de la información en soporte digital es mucho más efectiva pero, además, permite su explotación para otras cuestiones que no tienen nada que ver con el destino para el que fueron diseñadas en un primer momento. En el caso de la gestión de riesgos naturales, las estructuras que presentan las bases de datos administrativas pueden adaptarse perfectamente a los requisitos y demandas de esta materia. El problema es que no han sido pensadas para este fin, y en muchos casos, no existe un gran interés por la calidad de los datos introducidos, salvo en aquellos apartados referidos al cobro de impuestos. Sin embargo, si la administración y la población fueran conscientes de la importancia de estar correctamente registrados en las bases de datos administrativas, éstas ayudarían en la mejora de los servicios y especialmente en la gestión de las emergencias.

La evolución de las bases de datos administrativas consiste en su incorporación a los Sistemas de Información Geográfica, en la que el usuario no sólo ve una sucesión de datos y formularios sino que puede analizar cómo se distribuyen en el espacio. Pese a todo, esta tendencia aún no está implementada de manera general, en algunos casos porque aún se cree que el coste es demasiado elevado, en otros, por falta de técnicos especializados que puedan llevar a cabo esta operación y, en general, porque no se perciben los beneficios que podría reportar la adopción de estas metodologías. Por otra parte, la asociación directa de las bases de datos con los elementos espaciales, expresados en la cartografía digital, no es directa ni fácil de automatizar. En muchos lugares, esta codificación simple de calle y número de vivienda, no

siempre se utiliza o, al menos, no de una forma en la que se diferencien perfectamente. Así pues, se plantean diversos problemas que van más allá de los recursos económicos disponibles para su elaboración y mantenimiento. En muchos casos, los problemas son ideológicos o de concepto, en referencia a cómo una sociedad organiza espacialmente su comunidad, cómo la entiende y se mueve por ella.

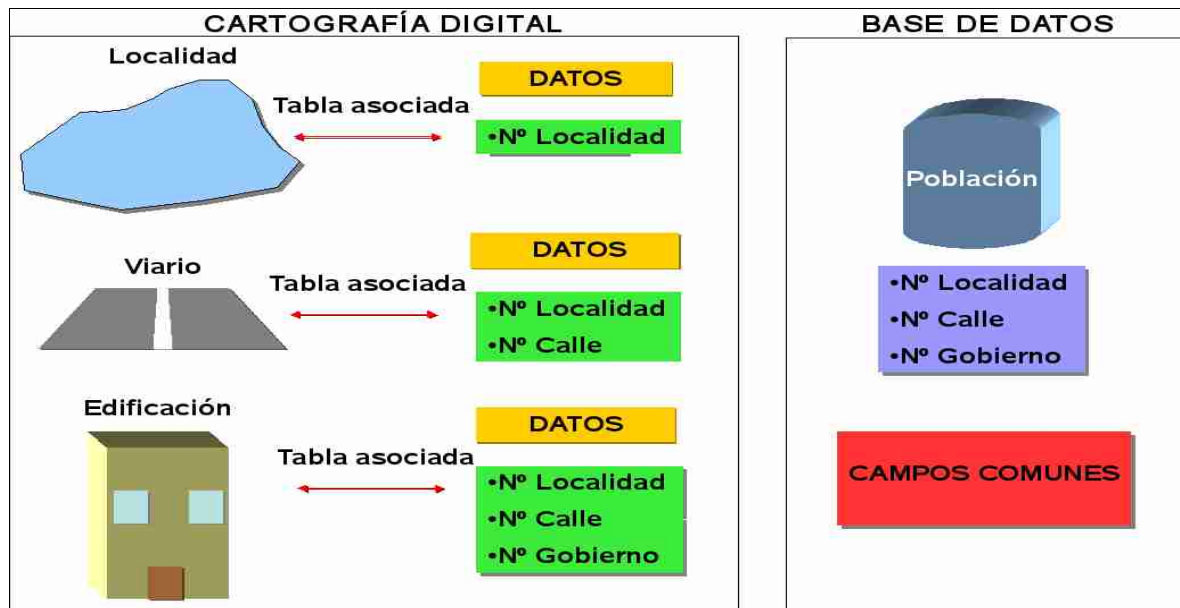


Figura 38: Asociación y georeferenciación de información en el SIG. Según las características de los datos, tanto en las bases de datos como en la cartografía digital, se podrán obtener asociaciones a distintos niveles de detalle.

Las características de la bases de datos y la sistematización y homogeneización del callejero, son aspectos claves para determinar el grado de georeferenciación de los datos de población disponibles o de cualquier otro que se considere importante. En la mayoría de los casos, únicamente se puede asociar el número de personas al núcleo en el que residen, especialmente en los lugares donde la escala de la cartografía no admite mayor resolución. Cuando se dispone de cartografía a escala adecuada, el problema se plantea con la información que lleva asociada, por ejemplo, si las edificaciones no están numeradas no pueden individualizarse desde el punto de vista alfanumérico, en cuyo caso, tampoco es posible el enlace con la información contenida en las bases de datos administrativas. En estas situaciones, sólo puede realizarse un trabajo relativo de aproximación con el fin de distribuir a la población en función de las áreas de residencia, siendo necesario introducir otro tipo de distribuciones estadísticas para evitar que los valores de población queden excesivamente concentrados en determinados puntos. Una escala adecuada de georeferenciación es la que permite situar al individuo en el edificio en el que reside, pues favorece la distribución de la población de forma más real y correcta, aunque esta situación es la menos habitual. En las

bases de datos de las administraciones en las zonas urbanas más desarrolladas, aparece el lugar de residencia de los habitantes con bastante detalle e, incluso, puede disponerse de cartografías digitales elaboradas al mismo nivel. Por el contrario, en otras zonas menos desarrolladas o con un carácter más disperso, resulta más complicado alcanzar detalles con resolución mayor al municipio o núcleo de población.

En los casos donde la resolución de la información disponible es heterogénea, el criterio a seguir es homogeneizar las bases de datos a partir de los elementos de menor resolución. Igualmente, cuando disponemos de una cartografía de detalle, pero los datos de población vienen dados a nivel municipal o por núcleos, puede aplicarse una metodología de aproximación para distribuir a la población, en función de la superficie de las zonas de residencia. Con ello, se consigue establecer una distribución más uniforme de la población.

Tabla 2: Ejemplo de datos utilizados para el volcán Chichón, México, donde la resolución de la información disponible sólo cubre el núcleo de población como un punto en el espacio. La cartografía y la escala general utilizada no permiten ampliar el detalle de los datos.

NOMBRE MUNICIPIO	NOMBRE LOCALIDAD	LON.	LAT.	ALT.	Población
CHAPULTENANGO	TOTAL MUNICIPAL				6965
CHAPULTENANGO	CHAPULTENANGO	0930745	172020	600	2794
CHAPULTENANGO	CARMEN TONAPAC	0931055	171825	600	292
CHAPULTENANGO	GUADALUPE VICTORIA	0930940	171918	500	597
CHAPULTENANGO	MOVAC PRIMERA SECCION	0930542	172145	440	203

2.4.2 Estructura de los datos

Los datos referentes a población y vías de comunicación deben estructurarse en un formato que pueda ser leído rápidamente por el motor de evacuación. La estructura más sencilla es generar, a partir del conjunto de datos, una única tabla que contenga toda la información. Tras varios ensayos, se ha optado por trabajar en modo vectorial dentro del SIG, tomando como capa base la red de comunicaciones de la que luego se exporta la tabla asociada. Las primeras pruebas se realizaron en modo *raster*, pero este formato planteaba numerosos problemas, como la simplificación de las vías de comunicación, los cruces y la imposibilidad de trabajar con resoluciones del orden de diez metros, debido al elevado volumen de datos que se generaba.

En modo vectorial, la capa original de líneas que representa la red de comunicaciones se convierte en una de puntos a través del discretizado de cada vía; este aspecto es fundamental, pues es el que realmente permite independizar todo el proceso del software SIG utilizado. Estos puntos están definidos por sus coordenadas y a cada uno se le añaden los atributos necesarios para completar la estructura requerida por el simulador de evacuaciones. Este procedimiento permite adaptar rápidamente la estructura de las tablas de datos y las aplicaciones software. Cada línea de la tabla de datos contiene, entre otros, los atributos que identifican a la vía de comunicación original y la posición del punto en ella. Todos los campos son numéricos y en aquellos casos donde la base de datos original no dispone de atributos numéricos, se asignan de forma automática. Estos atributos son:

- **Id_via:** Nombre de la vía. Una vez tenemos cada vía individualizada desde el punto de vista digital, procedemos a añadir los atributos en la tabla asociada, siendo los primeros aquellos que la identifican.
- **Id_via2:** Nombre secundario de vía. Para resolver el problema de las vías en las que se repite el nombre se ha añadido un segundo índice que vale cero para la principal.
- **Tip_via:** Tipo de vía. Caracteriza la vía de comunicación
- **Id_link:** Tramo. Si fuera necesario, una vía de comunicación podría dividirse en tramos, por ejemplo en el caso de que cambiara de morfología.
- **Cap:** Ancho útil de la vía de comunicación. Define el número máximo de personas que pueden circular por un punto en un tiempo dado, en función de las características del transporte utilizado y de la vía.

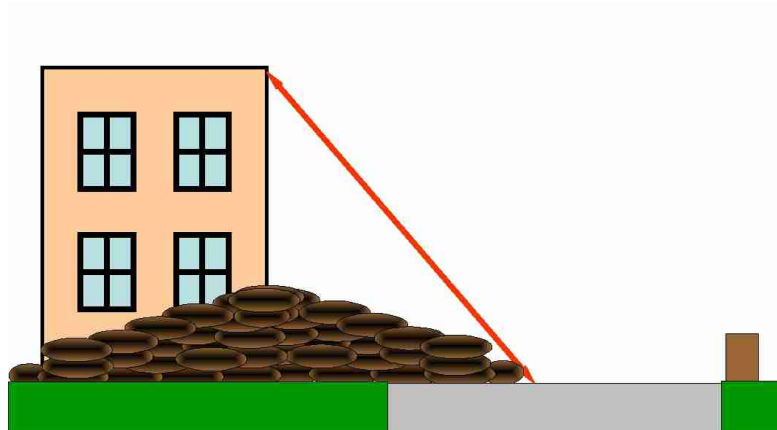


Figura 39: La vulnerabilidad frente a eventos sísmicos se establece simplemente admitiendo que el edificio o muro colapsará afectando una distancia igual a su altura

- **Vul_ce:** Vulnerabilidad por caída de cenizas. La metodología utilizada para el cálculo de las vulnerabilidades puede variar notablemente en función de la información disponible para el área de trabajo. El objetivo final es asignar un índice de vulnerabilidad a cada punto de la vías, de tal forma que se pueda calcular aproximadamente cuales podrían quedar cortadas. Ante la posibilidad de que se puedan combinar varios agentes de disparo en simultaneo, se han establecido tres tipos de vulnerabilidades, si bien, no tienen por qué provenir directamente del volcán
- **Vul_co:** Vulnerabilidad por colapso (taludes, muros, edificios, etc.)
- **Vul_fu:** Vulnerabilidad por flujos (lahares, coladas, etc.)
- **Id_pnt:** Número de punto. A continuación, los viales lineales se convierten en una capa de puntos, discretizada a incremento constante o variable, según las características de la red de comunicaciones y la escala de análisis utilizada. La simplificación de

elementos lineales a otros puntuales permite el procesado, fuera de cualquier herramienta específica, sin que se pierda mucha información.

- **Xcoord:** Coordenada X
- **Ycoord:** Coordenada Y
- **Id_cruce:** Número de cruce (caracteriza aquellos puntos situados en un cruce). Se identifican las intersecciones de la red viaria, generando un elemento que se denomina *cruce* y que equivale a un círculo cuyo radio está en función del discretizado utilizado, siempre ligeramente superior. A continuación, se asocian espacialmente las capas de información de puntos (vías de comunicación), con los *cruces* para asignar el atributo del número del *cruce* a los puntos del viario contenidos en éste. Todos los puntos situados en un cruce tienen un valor distinto de cero en el atributo *cruce*. Los puntos del viario que no están en un cruce poseen el atributo *cruce* igual a cero..
- **zona:** La *zona* agrupa puntos pertenecientes a una misma área. En el proceso de la evacuación, aunque sea autoevacuación, es conveniente zonificar el área de trabajo en zonas y definir en cada una de ellas puntos singulares que corresponden a los centros de recogida o salida
- **Salida:** Puntos que definen la salida de una zona. El atributo *salida* de cada punto se iguala a 0, excepto los que tienen esta característica activa que se les asigna 1.
- **N_hab:** número de habitantes asociados a un punto de una vía. En la fase de preparación de los datos, inicialmente los habitantes se asignan a un punto correspondiente a su vivienda (edificación, manzana, barrio, núcleo, población, etc., dependiendo de la escala utilizada), que se asocia espacialmente al punto de vía más próximo, definiendo el campo *número de habitantes*. Nótese que, a un solo punto de la vía, puede corresponderle los habitantes residentes en varias edificaciones o poblaciones cercanas.

Independientemente del formato utilizado por el SIG, el formato final de la tabla debe ser un formato texto (ASCII) con una cabecera en la que aparece el nombre de los campos entre comillas y separados por comas y las filas de datos en columnas separadas por comas. Todos los datos son *integer16*, salvo las coordenadas que son *float*. En cualquier momento, es posible añadir más campos a la estructura de datos, por ejemplo, la distribución por edades de la población.

La elección del discretizado de las vías de comunicación (distancia entre puntos), es un elemento muy importante para todo el proceso de cálculo posterior. Evidentemente, cuanto más pequeño sea el discretizado espacial, más resolución se alcanzará, pero ello requerirá tiempos de cálculo muy superiores. El discretizado espacial (*dx*) condiciona el discretizado temporal (*dt*) que representa cada iteración. El valor máximo de *dt* debe ser inferior al tiempo necesario para recorrer *dx* a la velocidad máxima que posea la vía de comunicación de mayor nivel. Por ejemplo, para un discretizado de 10 metros en una autopista con velocidad máxima de 120 km/h, el discretizado temporal debe ser menor a 0.3 segundos. El tiempo de cálculo

necesario es proporcional al inverso del discretizado temporal. Para la optimización del modelo debe llegarse a un compromiso entre la resolución y el tiempo de cálculo.

2.4.3 Diseño de los cruces

Los cruces son uno de los elementos más críticos para el simulador de evacuaciones pues, a partir de este elemento, quedan fijadas las rutas finales de salida para cualquier punto de la red de comunicaciones. Para la elaboración de los cruces o puntos de intersección del viario, se ha establecido una metodología relativamente sencilla que consiste en la obtención de dos nuevas capas de información, una de puntos y otra poligonal, tomando como referencia la capa lineal de la red de comunicaciones.

El primer paso consiste en calcular los nodos de la red viaria; la capa de puntos resultante representa las intersecciones o uniones de varias líneas, pero también su principio y final. Para ello, puede utilizarse cualquier *script* dentro del Sistema de Información Geográfica que realice esa función, siendo especialmente útiles aquellos que añaden a los atributos el número de líneas que intersectan en cada nodo. La ventaja de calcular los nodos es que sólo un único punto representa el enlace de múltiples vías, por contraposición a calcular el principio y final de cada vía, lo que generaría una duplicidad de puntos innecesaria. La fiabilidad o eficacia de este *script* está directamente relacionada con la calidad de la digitalización de la capa de líneas de la red de comunicaciones, sobre todo en lo que respecta a la unión de las líneas que representan los viales en los puntos de cruce.

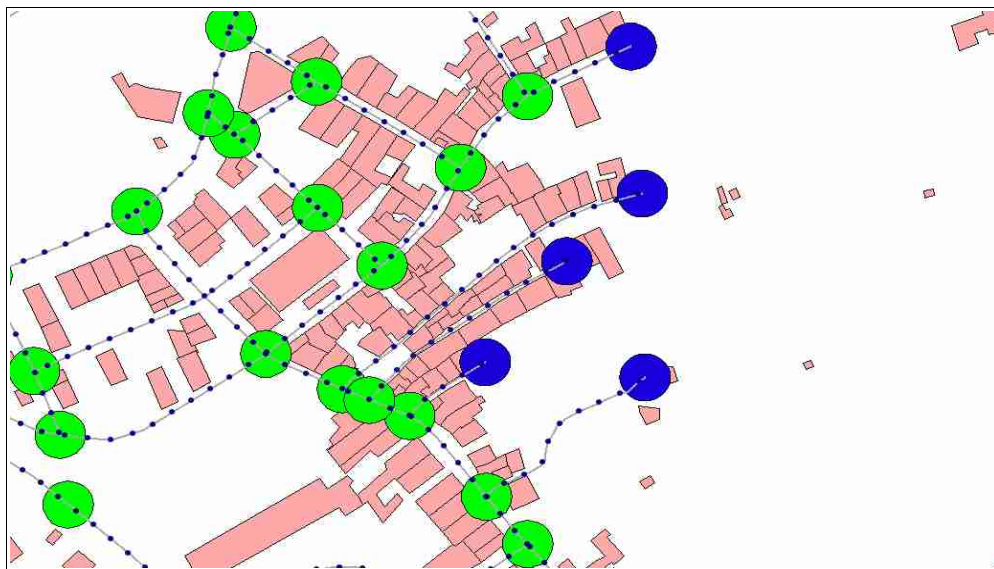


Figura 40: Los cruces-buffer que aparecen en azul corresponden al fin de vía, éstos no son tenidos en cuenta como cruces. Los puntos contenidos mantienen el valor 0 en el campo `ld_cruce`.

Una vez que se dispone de la capa de nodos, se calcula un *buffer* para cada uno, cuya distancia radial debe ser ligeramente superior al discretizado espacial (dx), establecido para la conversión a puntos del viario. El mejor resultado se obtiene cuando se establece un círculo de radio ligeramente superior (10%) al discretizado. De esta forma, se reduce el número de puntos contenidos del viario y se evita que cruces, relativamente cercanos, queden superpuestos. En zonas donde el trazado del viario sea complejo y posea numerosas vías con longitudes relativamente cortas, es conveniente trabajar en torno a los 10 metros de discretizado para el viario y 11 metros de radio para los círculos. Pruebas realizadas con círculos de 20 metros contenían demasiados puntos por vía y englobaban zonas que no pertenecían al espacio del cruce.

El *buffer* da lugar a una capa poligonal de círculos cuyo cometido es, mediante asociación espacial, determinar cuantos puntos de una vía de comunicación están contenidos en él y, por tanto, asignar ese valor en la tabla de atributos asociada; los puntos fuera de un cruce conservan el valor cero.

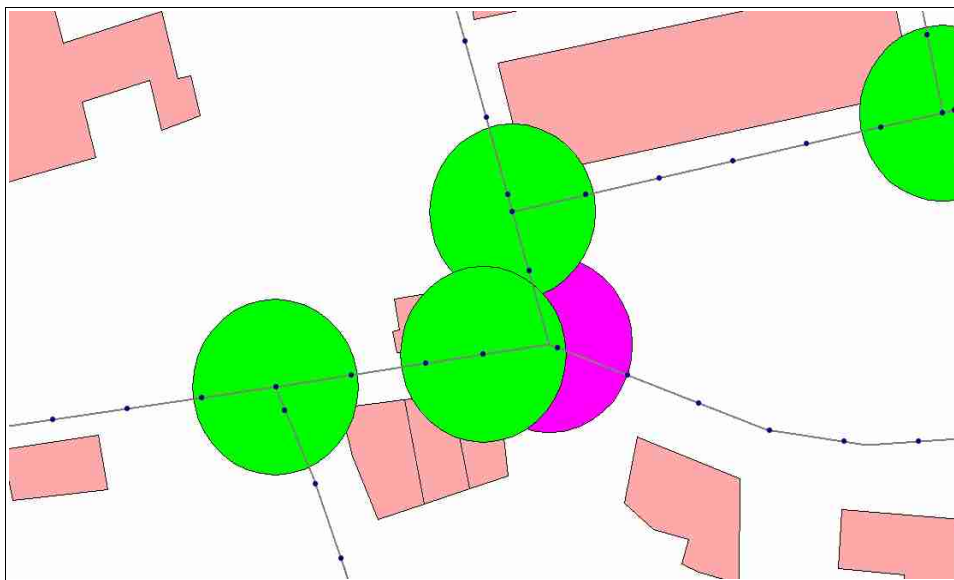


Figura 41: El cruce-buffer de color morado se encuentra situado por debajo de los anteriores. Al realizar la asociación espacial no hay ningún punto que quede incluido en él. Es importante identificarlos para anularlos.

Esta operación requiere algunos filtrados, especialmente si la escala de trabajo es de detalle, además, es conveniente catalogar el tipo de *buffer* a medida que se detectan los errores, para poder eliminarlos cuando se hacen las asociaciones espaciales:

- Contar cuantas vías están contenidas en un cruce. Aquellos en los que solo aparece una única vía de comunicación corresponden a finalización de vía. Este proceso puede hacerse de varias maneras; observando en los atributos de la capa de nodos cuantos poseen una sola vía, aunque no es fiable al 100%, o contando el número de vías por

cruce desde la capa de puntos que representa las vías de comunicación. A estos *buffer* se les denomina *fin de línea*.

- Buscar cruces superpuestos. Cuando dos nodos están muy próximos entre si, los *buffer* resultantes quedan casi superpuestos. Para detectarlos, debemos buscar los *buffer* que quedan sin asociar con los puntos de las vías de la red de comunicaciones; este proceso toma como referencia siempre el *buffer* situado en la parte superior, mientras que el inferior queda libre. A estos *buffer* se les denomina *superpuestos*.

Finalmente se dispone de tres tipos principales de cruces:

- *Correctos*: son los que quedan disponibles, con más de una vía convergente.
- *Fin de línea*: no se tienen en cuenta.
- *Superpuestos*: no se tienen en cuenta, se anulan.

Estas operaciones también permiten determinar dónde hay problemas de digitalización en la capa de líneas de la red de comunicaciones original.



Figura 42: Protección Civil, Italia. Evaluación de la vulnerabilidad de las estructuras próximas a las vías de comunicación. (Foto: R. Ortiz 2006, MESIMEX).

2.4.4 Vulnerabilidades de las vías de comunicación.

A la hora de determinar cualquier plan de evacuación, la característica de la red viaria es uno de los elementos fundamentales que deberá tenerse en cuenta. En este sentido, la

Universitat Degli Studi di Napoli Federico II (Italia), ha desarrollado una metodología que permite analizar la vulnerabilidad de las vías de comunicación (Zuccaro et al., 2008), a partir del cálculo de las vulnerabilidades de las estructuras que se encuentran ubicadas a ambos lados de la carretera (edificios, muros, etc.). La aplicación de esta metodología en tiempo real muestra las vías que pueden quedar parcial o totalmente cortadas y recalculan nuevas rutas de escape. Igualmente, en el caso de los planes de evacuación ya elaborados, puede evaluarse la viabilidad del mismo analizando las vías de comunicación más vulnerables. Para ello, se estudian las estructuras y características del terreno que circunda la vía, haciendo especial hincapié en las posibilidades de su derrumbe total o parcial. Otros elementos que se analizan en detalle son los puentes y viaductos, estructuras muy vulnerables ante determinado tipo de peligros y cuyo derrumbe corta totalmente la vía, dejándola inutilizable y sin posibilidades de recuperación en poco tiempo. Debemos destacar dos trabajos recientemente realizados que siguen esta línea y que se han aplicado al municipio de Icod de los Vinos, Martí et al., 2008c y Scaini, 2009.

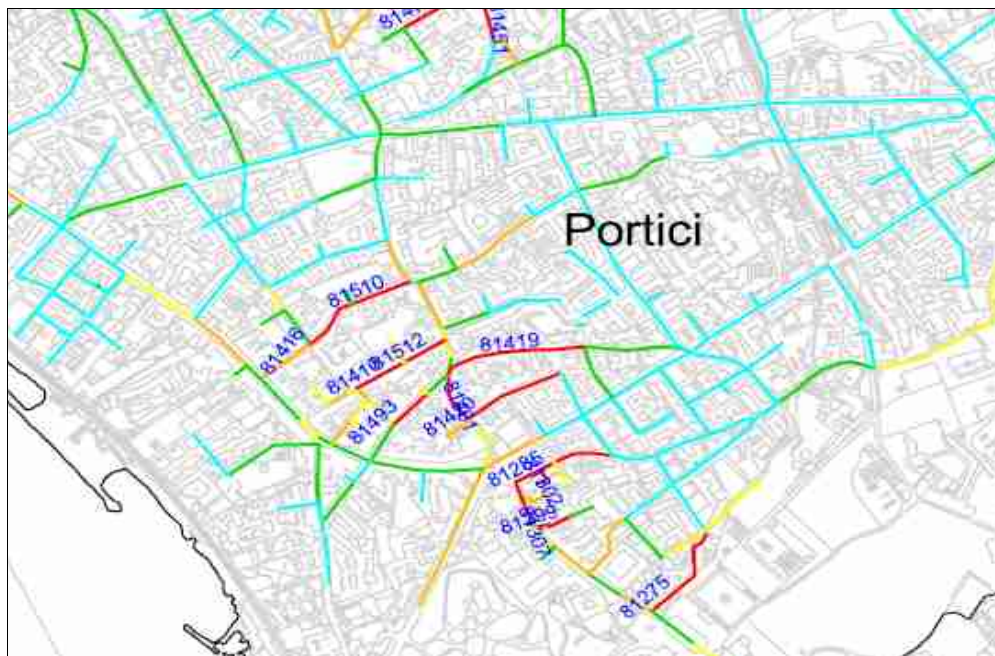


Figura 43: Ejemplo de vulnerabilidad sísmica para las vías de comunicación de Portici, Nápoles (Italia), MESIMEX 2006.

En este trabajo se considera también la vulnerabilidad de las vías de comunicación para caída de ceniza, flujos y colapsos, de acuerdo con las características concretas de las zonas objeto de estudio. En líneas generales, la metodología para determinar la vulnerabilidad de las vías no está establecida, depende de los datos disponibles y de la elección del operador. Sin embargo, para facilitar el proceso de cálculo y su rapidez, es recomendable tener previamente incorporados en el Sistema de Información Geográfica, varios índices específicos para el cálculo de las vulnerabilidades, que puedan cruzarse en cualquier momento con un mapa de

impacto; por ejemplo, un mapa de isosistas de un terremoto con la tipología de las construcciones próximas al punto de una carretera, o un mapa de caída de cenizas con el valor de la pendiente y la tipología de las construcciones. Estos índices no se exportan en la estructura de datos de la red de comunicaciones, permanecen ocultos o pueden estar incluidos en otras capas de información. El valor que necesita el modelo de simulación de evacuaciones es la vulnerabilidad final asignada a cada punto para cada tipo definido -cenizas, flujo y colapso- que se expresa en valores en porcentajes de cero a cien; el 50% implica una pérdida de capacidad de la vía a la mitad, lo que reduce o ralentiza el flujo, mientras que el 100% representa el corte total de la misma. Esta manera de operar permite establecer escenarios en los que el total de la red de comunicaciones esta operativa o situaciones donde está parcial o totalmente cortada.



Figura 44: Vulnerabilidad por flujos. En este caso, un lahar ha cortado la carretera y se ha construido un puente provisional. Volcán Tungurahua, Ecuador 2003 (Foto R. Ortiz)

Las condiciones meteorológicas adversas son otro factor que afecta a la viabilidad de la red de comunicaciones. En general, se trata de eventos de corta duración, salvo que produzcan daños importantes como deslizamientos, rotura de puentes, etc. En este caso, los factores de vulnerabilidad utilizados en el modelo permiten representar adecuadamente esta circunstancia. Para simular evacuaciones bajo fuertes lluvias o nevadas, basta con modificar la capacidad de las vías de comunicación y la velocidad máxima asignada. Como esta operación se realiza en el entorno SIG, pueden utilizarse algoritmos que relacionen capacidad y velocidad máxima con el tipo de vía y las características de su trazado, por ejemplo cruce de barrancos, taludes inestables, etc.

Hay que tener en cuenta que las evacuaciones son procesos complejos en los que intervienen multitud de variables. Esperar hasta el momento en el que el volcán comience su actividad, incrementa la incertidumbre y el esfuerzo necesario para llevarlas a cabo. Las cenizas no solo dejan impracticable buena parte de las vías de comunicación, sino que también dañan los motores de los vehículos. En la erupción de 1982 del volcán Chichón, en Chiapas,

en muchas carreteras resultaba complicado utilizar los dos carriles debido a los numerosos vehículos averiados que se encontraban en ellas (De la Cruz-Reyna y Del Pozzo, 2009). Por ello, la recomendación es siempre realizar una evacuación preventiva, donde puede contarse con el buen estado de la red de comunicaciones y la posibilidad, si fuera necesario, de utilizar apoyo aéreo.

2.4.5 Zonificación

La zonificación es un elemento opcional que permite dirigir la evacuación hacia las vías principales. Mediante este elemento espacial se ordenan los cruces de forma más efectiva, es decir, todos los puntos incluidos en una zona tendrán como salida un único cruce que los conectará con otra zona vecina. En el caso de optar por el diseño de una evacuación secuencial de un área, la zonificación también permite establecer el orden de salida para cada zona establecida.

Los criterios que se siguen para establecer la zonificación dependen de la escala de trabajo utilizada: en áreas extensas, se utilizan criterios de tipo geográfico que permitan individualizar espacios, mientras que, en zonas urbanas, se utiliza la jerarquía de la red de comunicación. En ambos casos, el operador debe tener un conocimiento amplio del área de trabajo y proceder a realizar diversas pruebas. El modelo comprueba que la solución adoptada no deje población aislada. Un cambio en la estrategia de evacuación, especialmente en los lugares de destino, exige revisar la configuración de las zonas.

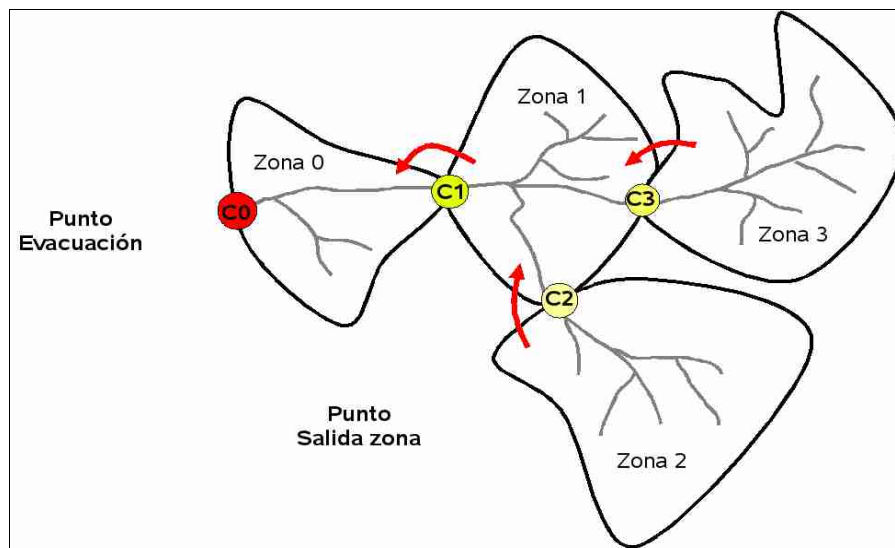


Figura 45: Ejemplo de zonificación y cruces de enlace.

Establecer una metodología definida para el diseño de la zonificación de un área de trabajo resulta muy complicado, la variabilidad de escenarios, escalas de trabajo, tipos de redes de comunicación, ambientes geográficos e incluso época del año, entre otros, dificultan esta labor. Por ello, no sólo son importantes los conocimientos adquiridos que se te tengan de la

zona de trabajo sino también la posibilidad de realizar simulacros, ejercicios o, si la situación lo requiere, evacuaciones reales que permitan definir la mejor estrategia posible

2.5 Metodología para la preparación de datos

Como se ha indicado, la estructura final de los datos necesaria para que el simulador de evacuaciones opere es siempre la misma, independientemente de la zona de estudio y de la escala de análisis. Sin embargo, desde el punto de vista metodológico, los pasos seguidos para obtenerla no han sido los mismos en cada una de las zonas de estudio, ni tampoco los problemas que se han planteado. Por este motivo, aunque hay una serie de aspectos generales, son los detalles y características de cada zona los que enriquecen las directrices metodológicas que se han seguido.

2.5.1 Datos disponibles y preparación para el volcán Teide

Para la aplicación en el volcán Teide se ha utilizado el ArcView 3.2, especialmente, porque ha sido el primer lugar de investigación, antes de comenzar a utilizar aplicaciones de software libre y tener mejor definida la metodología finalmente presentada en este trabajo. Los *scripts* para la preparación de los datos se programaron en *AVENUE*, tomando como base otros existentes y realizando las adaptaciones necesarias; el principal de los *scripts* que permite convertir las líneas en puntos, se ha añadido en el apéndice 1.

La cartografía digital que sirvió de base, pertenece a la serie de 1996 a escala 1:5000 y a la serie de 2002 a escala 1:1000; también se han utilizado mapas impresos -basados en las dos primeras escalas en los que aparecen los número de gobierno- y las ortofotos de 1996 de Cartográfica de Canarias, S.A (GRAFCAN). Finalmente, se ha usado como apoyo la cartografía de la Dirección General del Catastro, actualizada al año 2004. Otra parte de la información cartográfica ha sido proporcionada por el Ayuntamiento de Icod de Los Vinos, junto a las tablas de información del callejero oficial y el número de habitantes extraídos de la base de datos del padrón municipal de 2005. El discretizado utilizado ha sido de diez metros, mientras que el radio para los *buffer* es de once metros.

El nivel de detalle alcanzado se ha logrado gracias a la confluencia de varios factores:

- Existir una cartografía digital elaborada a escala 1:5000, e incluso mayor para algunos núcleos, tanto para la red viaria como para las edificaciones del municipio.
- Identificar e individualizar las edificaciones existentes (al menos los portales que dan acceso a las mismas), independientemente de si es un edificio, vivienda familiar o, incluso, un edificio administrativo. Acceder a los datos básicos municipales³, de los que se extrae únicamente nombre de la calle y número de vivienda por habitante manteniendo el anonimato de las personas.

3 Estos datos fueron obtenidos dentro del marco de colaboración establecido entre el Departamento de Volcanología del MNCN del CSIC, Madrid y el Ayuntamiento de Icod de Los Vinos, Tenerife, Islas Canarias y siguiendo el procedimiento establecido en la ley Orgánica 15/1999 del 13 de Diciembre de Protección de datos.

- Tener un callejero bien definido, en el que cada vía posee un nombre que la diferencia de las demás. Si existen varias vías con el mismo nombre, es habitual que a nivel de base de datos se utilice un número para diferenciarlas

2.5.1.1 Distribución de la población

Para alcanzar el nivel de detalle deseado ha sido necesario invertir gran cantidad de tiempo y esfuerzo en preparar una cartografía que reuniera las condiciones adecuadas, tanto para la red de comunicaciones como para las edificaciones. Para la elaboración de la cartografía de edificaciones, se combinaron tres capas de información distintas: la cartografía de GRAFCAN a escala de detalle 1:5000 que cubre toda la zona de estudio, tiene los polígonos cerrados pero no individualiza las estructuras en los lugares donde el entramado urbano es continuo, aunque sí lo hace en las áreas de caserío disperso. La cartografía a escala 1:1000 que tiene un alto nivel de detalle, aunque solo abarca determinados núcleos urbanos del municipio, sin embargo, su desorganización es tal, que prácticamente no puede distinguirse donde empieza una edificación y termina otra; además carece de polígonos cerrados. Como dato positivo, tiene incluido el *número de gobierno* de los portales de acceso a las vivienda y su localización espacial, muy útil en el caso de las edificaciones ubicadas en los cruces; lo que posibilita determinar a qué calle pertenece ese portal. Finalmente, la cartografía catastral posee cierto detalle, pero no representa las edificaciones sino las parcelas y al superponerla con las anteriores se observa un desajuste, aunque la diferencia no es excesiva.

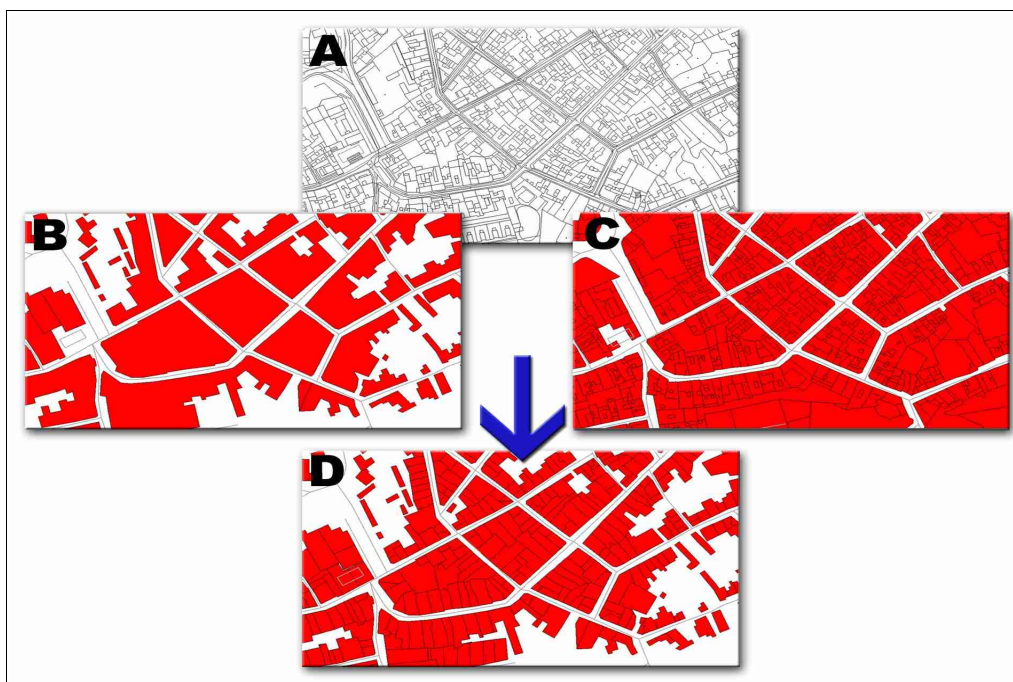


Figura 46: Combinación de cartografías para obtener la capa de edificaciones definitiva: A, escala 1:1000 del año 2002, GRAFCAN. B, escala 1:5000 del año 1996, GRAFCAN. C, escala 1:1000 del 2004, Catastro. D, resultado final

La opción final ha consistido en utilizar la capa a escala 1:5000 y, a partir de la superposición de las mencionadas 1:1000 de 2002 y de 2004, ir subdividiendo manualmente los polígonos, tantas veces como fuera necesario en función del número de edificaciones, tomando como referencia el número de gobierno y el parcelario; en algunos casos se ha añadido una subdivisión ficticia cuando el edificio tiene más de un portal, o sea, más de un *número de gobierno* asignado. Además de la división manual del polígono equivalente a una edificación, los datos alfanuméricos del número de gobierno y de la calle a la que pertenece el portal, se han introducido de forma parcialmente manual. Dado que esta era la fase inicial de preparación de la cartografía, sobre la que luego se aplicaría la metodología desarrollada, se consideró conveniente minimizar los posibles fallos. Cualquier método de automatización para realizar esta función hubiera introducido un número importante de errores. Esta capa final, de elaboración propia, no permite el cálculo exacto de la superficie de las estructuras, pero sí da una idea aproximada del espacio que ocupa y, además, permite añadir todos aquellos atributos que caracterizan a una edificación, entre ellos, el número total de personas que residen en el inmueble, generando una distribución espacial de la población aceptable. Se intentó reducir la escala de trabajo a nivel de vivienda, pero la nomenclatura utilizada en la base de datos para distinguirlas varía mucho, especialmente en los edificios o edificaciones con varias viviendas y, además, estos campos no estaban perfectamente individualizados en la base de datos.

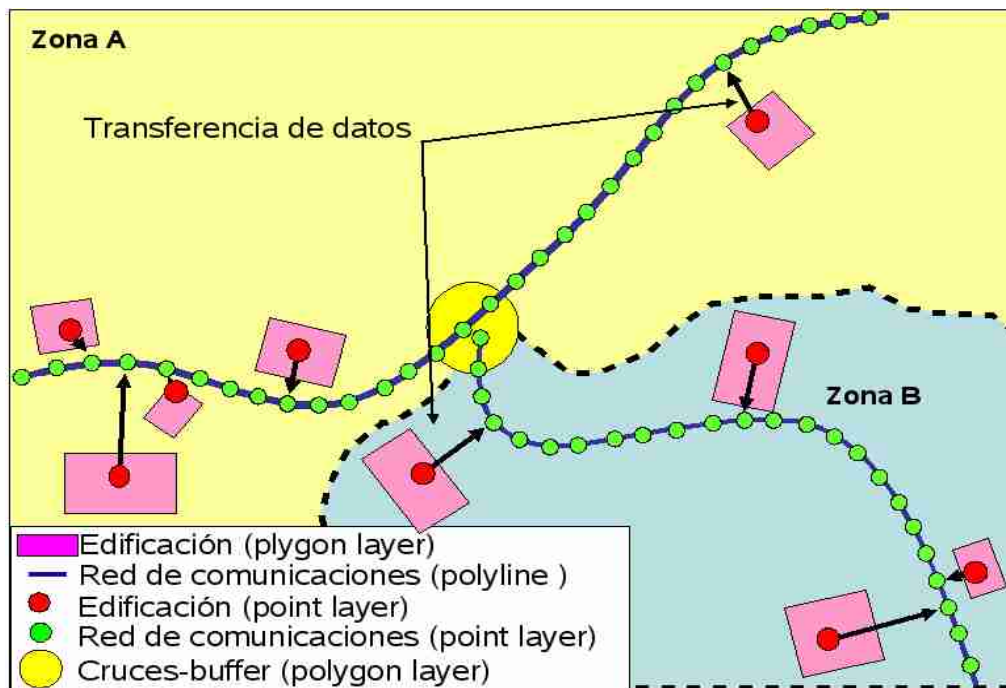


Figura 47: Esquema cartográfico final obtenido tras la aplicación de la metodología desarrollada.

Uno de los elementos necesarios para alcanzar la escala de aproximación utilizada en este trabajo es que, todas y cada una de las edificaciones o, al menos la inmensa mayoría de ellas, deben tener su *número de gobierno* asignado. Este elemento, junto al número de la calle en el

mismo. Por tanto, la primera fase consiste en individualizar cada vía de comunicación para que posea un único elemento vectorial que la identifique. Para ello, se combina la capa de vías de 1996 escala 1:5000 de GRAFCAN, con otra elaborada por el propio Ayuntamiento, en la que solo aparece el callejero oficial y, como resultado, se obtiene una capa donde, además de las vías registradas administrativamente, se añaden otros caminos de menor entidad que también forman parte de la red viaria y que pueden ser muy útiles en el caso de una evacuación. Una vez terminada esta fase, se procede a asociar cada una de las vías de comunicación con el nombre o código administrativo que posea, exceptuando los caminos que no están registrados, a los que se añade un código similar alternativo. La escala de detalle 1:5000 ha sido suficiente para disponer e integrar todas y cada una de las vías existentes y las más recientes se han añadido utilizando ortofotos parciales actuales obtenidas del *Google Earth*.

2.5.1.3 Problemas detectados en los datos

Teóricamente, al trabajar a escalas de detalle se pueden obtener resultados más precisos, sin embargo, también suelen quedar en evidencia un número mayor de errores en los datos disponibles, algunos de los cuales son fácilmente detectables en el Sistema de Información Geográfica.

En relación a los datos extraídos del padrón de habitantes, su asociación con la cartografía digital pone de relieve ciertas incongruencias, entre ellas, el número de personas que habitan en un inmueble y el hecho de que muchos de estos figuren vacíos en pleno centro urbano. En consecuencia, una vez asociadas las bases de datos y la cartografía digital en el GIS, los datos obtenidos deben ser tomados de forma aproximada y nunca de forma exacta, especialmente en el caso de las evacuaciones organizadas, en las que se debe prever los medios necesarios para llevarlas a cabo. Es conveniente considerar un número ligeramente superior de recursos al indicado por el sistema, en el que además se tenga en cuenta la población residente en situación ilegal que, en los últimos tiempos, en España supone un contingente importante de personas difícilmente cuantificable, precisamente por su situación aunque, en el caso de Tenerife, se localiza principalmente en el área metropolitana de la isla y en la zona sur en torno al enclave turístico de Los Cristianos y Las Américas. Este problema de discrepancias en los datos no deriva de una mala configuración o estructuración de la bases de datos utilizada, ya que esta herramienta habitualmente está bien construida y estructurada, localizándose la mayoría de los errores en su uso o en la calidad de la información que se vierte en ella. En este trabajo, se detectaron dos problemas: uno asociado con la actualización de los datos por parte de los usuarios empadronados en el término municipal y el otro, derivado de la acción de cambiar el nombre de algunas calles por parte del Ayuntamiento y no migrar a los ciudadanos afectados a la nueva dirección.

Las causas que motivan que una persona no actualice sus datos en el padrón de habitantes pueden ser muy variadas, entre ellas:

- Cambio de un municipio a otro, el proceso conlleva un papeleo excesivo y si la situación no es definitiva, por ejemplo en el caso de compra de una vivienda, muchas personas no están dispuestas a llevarlo a cabo.
- El cambio de dirección no se produce en cascada, esto quiere decir que todas las instituciones donde las personas están dadas de alta por un motivo u otro, no reciben la nueva dirección, salvo que sea notificado por el interesado, algo que puede resultar un proceso arduo (compañía eléctrica, Consorcio de Tributos, etc.).
- En las zonas de población relativamente pequeñas, muchas veces las personas conservan sus datos residenciales originales, habitualmente asociados al domicilio de sus padres. En la mayoría de los casos, hasta que no forman una relación estable o adquieren una residencia en propiedad, no suelen actualizar los datos en el padrón. Así, podemos encontrar residencias unifamiliares con un elevado número de personas pero que en realidad, está ocupada por una o dos personas, o edificios residenciales prácticamente deshabitados.
- El empadronamiento es considerado únicamente con finalidad administrativa, tanto para las personas como para la administración y, en ningún caso, se considera un elemento que puede ayudar en la gestión y mitigación del riesgo para una zona expuesta. Por tanto, si la persona considera que su situación actual, empadronado en otro lugar, no le afecta, prefiere mantenerla.
- Los cambios sociales derivados del incremento de divorcios o los complejos procesos que se producen en el ámbito de la inmigración, hacen que mucha gente haya abandonado su lugar de residencia de origen, para establecerse provisionalmente en otro lugar, en el que deben valorar si se dan de alta administrativamente o no. En el caso de la inmigración ilegal, un fenómeno cada vez más extendido, no pueden declarar su situación aunque quieran.

En general, una investigación detallada mostraría multitud de casos por los que pueden encontrarse, en la actualidad, edificaciones residenciales vacías o casi vacías en varias zonas cuando, en realidad, están ocupadas. Esta situación se ha visto agravada debido al cambio de nombre de las calles; administrativamente se seguía todo el proceso de forma correcta, sin embargo, las personas que residían en esas vías de comunicación no llegaron a cambiar su dirección en el padrón ni en ninguna de las bases de datos asociadas. En la actualidad encontramos habitantes con una dirección, asociada a las antiguas calles, que teóricamente no existe y otros con la dirección correcta porque se empadronaron con fecha posterior al cambio de nombre de la calle.

El tratamiento y confección del callejero oficial del municipio es un elemento clave para la metodología desarrollada en este trabajo, por ello, se han detectado una serie de dificultades para las que ha sido necesario adoptar medidas específicas:

- Vías de comunicación con un nombre distinto a cada lado de la calle. A veces no se tiene claro el concepto de vía de comunicación como un elemento espacial individual e independiente, con un principio y un final. En este caso, se han detectado algunas vías

de comunicación a las que se les había asignado un nombre distinto a cada lado de la acera. El motivo se debe a que dichas vías funcionan al mismo tiempo como límites administrativos que separan núcleos de población, además de ser elementos de comunicación. Al mezclar ambos conceptos, se decidió adoptar la medida de nombres distintos. Para paliar este problema se han digitalizado dos vías de comunicación como líneas paralelas, conectadas entre sí en los extremos.

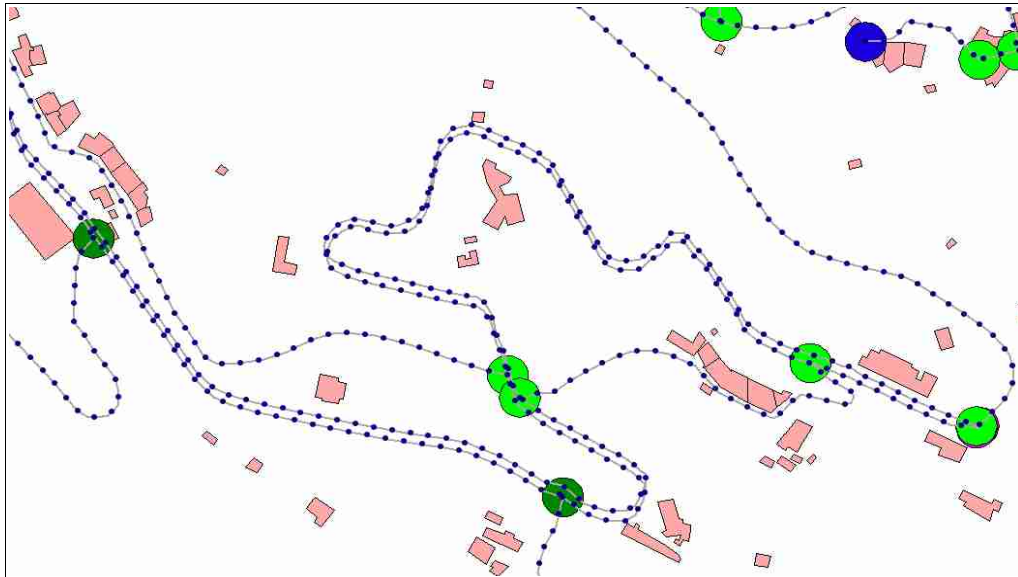


Figura 49: Ejemplo de vía de comunicación con dos nombres, uno a cada lado de la acera. Para digitalizarla se duplicó el registro original y se desplazó ligeramente. Luego se unieron los extremos. Debe comprobarse que los cruces en los extremos son los correctos.

- Vías que se repiten con denominación común. Suele ser frecuente, especialmente cuando las vías de comunicación son nuevas o recorren un pequeño poblado; sin embargo, plantea ciertas dificultades en el proceso de georeferenciación si la numeración de las edificaciones se reinicia en cada tramo, lo que hace que resulte prácticamente imposible digitalizar la vía de comunicación como un solo elemento y, no es aconsejable, la unión de elementos separados espacialmente. La solución adoptada ha sido crear un segundo índice para distinguirlas (Id_via2).
- Vías principales de comunicación que recorren el municipio, pero a las que se les pone nombre en los tramos donde atraviesa un determinado enclave poblacional. Desde el punto de vista de la digitalización, esto obliga a dividir en tramos una misma vía de comunicación, sólo por haber cambiado el nombre, aunque mantenga sus características morfológicas intactas. Pese a todo, no tiene porque constituir un problema, aunque sí hay que tenerlo presente. A veces, lo más complicado es determinar donde empieza y donde termina, especialmente en áreas de caserío disperso.

- Renombrar vías de comunicación sin actualizar los datos de las personas residentes en ellas. A una vía ya existente se le cambia el nombre siguiendo el proceso administrativo reglamentario, sin embargo, a los habitantes no se les actualiza la nueva dirección. De esta forma, en la base de datos actual se encuentran personas inscritas en el padrón con la antigua dirección, en una calle que teóricamente ya no existe y a los empadronados con fecha posterior, con la dirección correcta actualmente. Si el operador desconoce este problema, a la hora de asociar los habitantes del padrón a la capa de edificación, un número importante de personas queda fuera del mismo, puesto que una edificación no puede tener dos direcciones de forma simultánea. La solución adoptada ha sido, una vez localizadas la vía de comunicación problemáticas, cambiar manualmente la dirección de los habitantes que seguían con el nombre antiguo de la calle. De esta forma se evita pérdida de datos.

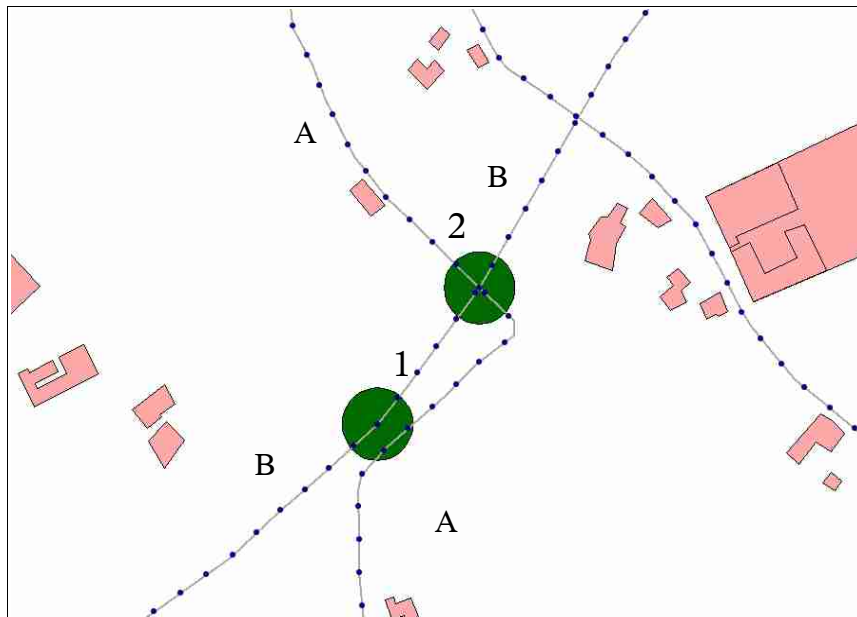


Figura 50: La vía de comunicación A, parece que se comunica directamente con la vía B, pero en realidad están separadas. Se han corregido manualmente los cruces-buffer que aparecen; en el primer caso, porque se aproximan demasiado, en el segundo, porque la vía A cruza sobre la B mediante un puente, sin que se toquen.

- Vías de comunicación que no están identificadas administrativamente, no constan oficialmente y por ello no tienen asignada población en las bases de datos aunque hayan viviendas próximas. Esta situación está muy relacionada con la titularidad de la vía de comunicación, pública o privada, ya que en este último caso no se tienen en cuenta. Sin embargo, desde el punto de vista del diseño de evacuaciones, cuando la escala que se utiliza es de mucho detalle, es importante disponer de la totalidad de vías que estén contenidas en el área de trabajo.

Otro problema encontrado al crear la estructura de datos se debe al hecho de trabajar a una escala de detalle en un área relativamente reducida, donde la longitud de las vías de comunicación es menor, mientras que la densidad es mayor, generando un elevado número de dificultades a la hora de fijar los cruces. Al utilizar esta aproximación de detalle, la calidad de la digitalización de la capa lineal, del viario original, resulta mucho más crítica. Por el contrario, a escalas más pequeñas, cuando se cubren áreas extensas en las que se unen poblaciones, la densidad y el número de cruces resultante es menor, lo que reduce considerablemente la posibilidad de errores y el esfuerzo necesario, como se verá en el caso del volcán Chichón o Popocatepetl en México. Estos son algunos de los problemas detectados y las soluciones que se han aplicado:

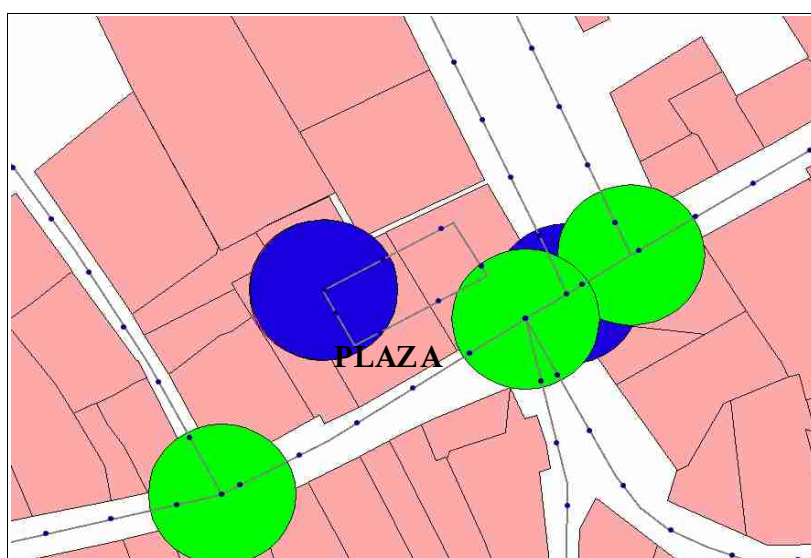


Figura 51: La plaza no tiene personas registradas con esa dirección en el padrón de habitantes. En este caso, podemos aislarla deshabilitando el cruce o tratarla como una vía de comunicación con salida única.

- Enlace artificial de vías que están separadas y no se comunican entre si. Aunque no es frecuente, cuando se relaciona la capa de cruces con los puntos del viario, quedan enlazadas vías de comunicación cuyos puntos final e inicial están separados por una distancia muy corta, ligeramente superior o menor que el discretizado establecido. Hasta ahora, resulta complicado detectar este error automáticamente, las correcciones se han hecho mediante inspección visual; en la tipología de cruce se les ha denominado *ficticios* para distinguirlos del resto.
- Plazas que están presentes en el callejero oficial pero no son vías de comunicación, sino recintos cerrados bordeados por calles. Se debe prestar especial atención a los cruces que se hayan creado en estas zonas y seleccionar sólo uno de ellos que enlace con la vía principal. Es posible que no todas las plazas tengan habitantes asociados, con lo cual se debe valorar la posibilidad de anular el cruce y dejar la plaza como un elemento aislado.

- Creación de cruces superpuestos debidos a errores de digitalización. En los casos donde la digitalización no es perfecta, especialmente si no se ha utilizado la función *snap* para unir los extremos de las líneas, el punto final de una vía no coincide con el inicial de otra. En ese supuesto, se crean dos nodos, lo que da lugar a dos cruces superpuestos. El proceso de asociación espacial elimina uno de los cruces, ya que la relación alfanumérica que se produce es de 1 a 1 (un punto del viario se asocia con el primer cruce que encuentra). Un método alternativo para evitar la duplicidad de cruces consiste en detectar aquellos cruces cuya distancia de separación sea menor que el discretizado o donde los nodos estén a distancia muy próximas.

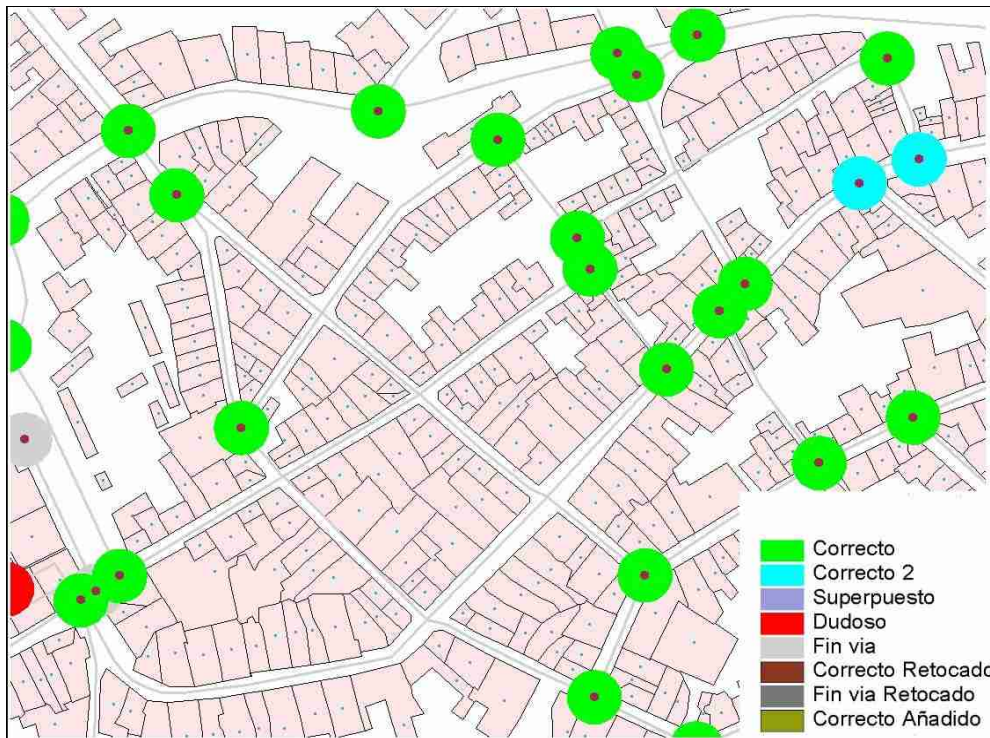


Figura 52: La dificultad de trabajar a escala de detalle hace que la aplicación de los cruces requiera numerosas fases de filtrado y revisión, de ahí la complejidad de la leyenda resultante.

- Errores en los cruces debido al redondeo en la función de discretizado. Hay que tener presente, en los *scripts* diseñados para discretizar las vías de comunicación, que la función de redondeo puede generar errores al dejar de añadir algún punto en el extremo final de la vía de comunicación. Debido a ello, se pueden generar vacíos en algunos cruces donde el trazado es complicado; en unos casos se detectan como si fueran finalización de línea si no tienen otra vía incluida; en otros, cuando confluyen varias vías, el error puede pasar desapercibido, dando lugar a que una de las vías de comunicación se quede sin salida.

2.5.2 Datos disponibles y su preparación para el volcán Chichón, México

Para la aplicación en el volcán Chichón, México se ha combinado el GVSIG, versión 1.1 junto a las extensiones Piloto 3D y Sextante con el ArcView 3.2, dado que algunos *scripts* no se han adaptado para software libre. La principal fuente pública de datos cartográficos de México es el INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). De él se obtuvieron diversas capas vectoriales:

- Cartografía base escala 1:1000000
 - <http://mapserver.inegi.gob.mx/data/inflm/descarga.cfm?>
- Modelo digital del terreno escala 1:50000
 - <http://mapserver.inegi.org.mx/DescargaMDEWeb/?s=geo&c=977>
- Acceso a las ortofotos mediante el servidor WMS a una escala aproximada 1:20000
 - http://antares.inegi.gob.mx/cgi-bin/map4/mapserv_orto?

Para la información de detalle, la UNICACH (Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, México), proporcionó el Plan de Emergencia de 2007 para el volcán Chichón, en el que encontramos datos de población, mapas de la zona de trabajo y el *mapa preliminar de la zonificación del riesgo* para el volcán.

El Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) presenta los resultados del *II Censo de Población y Vivienda 2005* en un conjunto de 121 indicadores para 187938 localidades habitadas en el país. Este dato hace referencia a la información de población que está incluida en la capa de localidades.

El escaso detalle de la información disponible inicialmente, hizo necesario mejorar la capa vectorial correspondiente a las vías de comunicación del entorno próximo al volcán Chichón; para ello, se digitalizaron las vías manualmente, utilizando como referencia la capa de ortofotos que proporcionaba el INEGI a través del servidor WMS. La escala de las cartografías utilizadas no tenía el suficiente detalle para poder aplicar el modelo de evacuación con unas mínimas garantías de calidad en los resultados finales, en muchos lugares sencillamente no había vías de comunicación. Posteriormente, a través de la UNICACH, se obtuvo una capa que disponía de ese nivel de detalle, pero las líneas que representaban las vías de comunicación estaban excesivamente divididas en multitud de tramos; la solución final fue combinar ambas, aprovechando los trazados de la primera y añadiendo información de la segunda para indicar el tipo de vía, además de completar algunas zonas importando también el elemento vectorial que representa la vía de comunicación, aunque con los tramos unificados.

En cuanto a las localidades, inicialmente se utilizaron las proporcionadas por el Plan de Emergencia del volcán Chichón y, dado que todas vienen con las coordenadas, fue fácil cargarlas en el Sistema de Información Geográfica. Se observó que el Plan de Emergencia dejaba fuera algunas localidades importantes, pese a estar relativamente próximas al volcán. Por este motivo, se ha utilizado otra capa diferente que muestra todas las poblaciones.

Finalmente se procedió a re proyectar la información disponible a UTM, zona 15, mediante la selección de un espacio de trabajo previo. El modelo de evacuaciones trabaja actualmente en UTM, aunque se ha implementado la posibilidad de trabajar en grados introduciendo el radio de la Tierra local.

2.5.3 Datos disponibles y preparación para el volcán Popocatépetl, México

La información utilizada para el volcán Popocatépetl, México, proviene de las mismas fuentes que en el caso del volcán Chichón. La cartografía utilizada pertenece al INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía), utilizándose las siguiente capas vectoriales:

- Cartografía base escala 1:1000000
 - <http://mapserver.inegi.gob.mx/data/inf1m/descarga.cfm?>
- Modelo digital del terreno escala 1:50000
 - <http://mapserver.inegi.org.mx/DescargaMDEWeb/?s=geo&c=977>
- Acceso a las ortofotos mediante el servidor WMS a una escala aproximada 1:20000
 - http://antares.inegi.gob.mx/cgi-bin/map4/mapserv_orto?

Las capas vectoriales correspondientes a las rutas de evacuación del Plan de Emergencia del volcán Popocatépetl fueron proporcionadas por el CENAPRED (Centro Nacional de Prevención de Desastres) y los mapas donde aparece la información relacionada con su uso puede descargarse desde la página web de esta misma institución:

<http://www.cenapred.unam.mx/es/Instrumentacion/InstVolcanica/MVolcan/RutasEvacuacion/>

Para la caracterización del entorno del volcán Popocatépetl en el momento actual se utilizó el *II Censo de Población y Vivienda 2005* realizado por el INEGI.

Para los datos estadísticos, fases y caracterización de la evacuación que se llevó a cabo en el Estado de México en el año 2000, ha sido utilizada la *Memoria de las Acciones del Plan Operativo del volcán Popocatépetl del 15 al 27 de diciembre del año 2000* realizada por la Protección Civil del Estado de México.

Teniendo en cuenta que la zona de trabajo propuesta para el volcán Popocatépetl es relativamente reducida y que únicamente se utilizan las vías de comunicación que aparecen indicadas como rutas de evacuación, el montaje de los datos no ha presentado ningún problema. Hay que señalar la incorporación de la vía férrea que fue utilizada durante la evacuación de diciembre de 2000.

2.6 Desarrollo del motor de evacuación

El motor de evacuación es el módulo de procesamiento central del modelo de evacuación. Procesa los datos de entrada que contienen la información sobre la red viaria, ubicación de la

población y vulnerabilidad de las vías, para obtener la distribución de la población a lo largo del tiempo durante el proceso de evacuación. Acepta que se modifique la red viaria, simulando cortes de carreteras debido a diversas causas (caída de cenizas, sismos, accidentes de tráfico, etc...). La salida de datos está georeferenciada y es revertida al SIG para su análisis. El modelo está desarrollado en C++. La base es un objeto que denominamos *punto*, que contiene todas las propiedades de la vía, población residente y en circulación. En cualquier momento pueden añadirse más propiedades al *punto*. El número de objetos *punto* dependerá del discretizado espacial de la red viaria que se haya realizado, mientras que el discretizado temporal se elige lo más pequeño posible, en función de la capacidad del computador y la estabilidad de la solución que depende también del discretizado espacial.

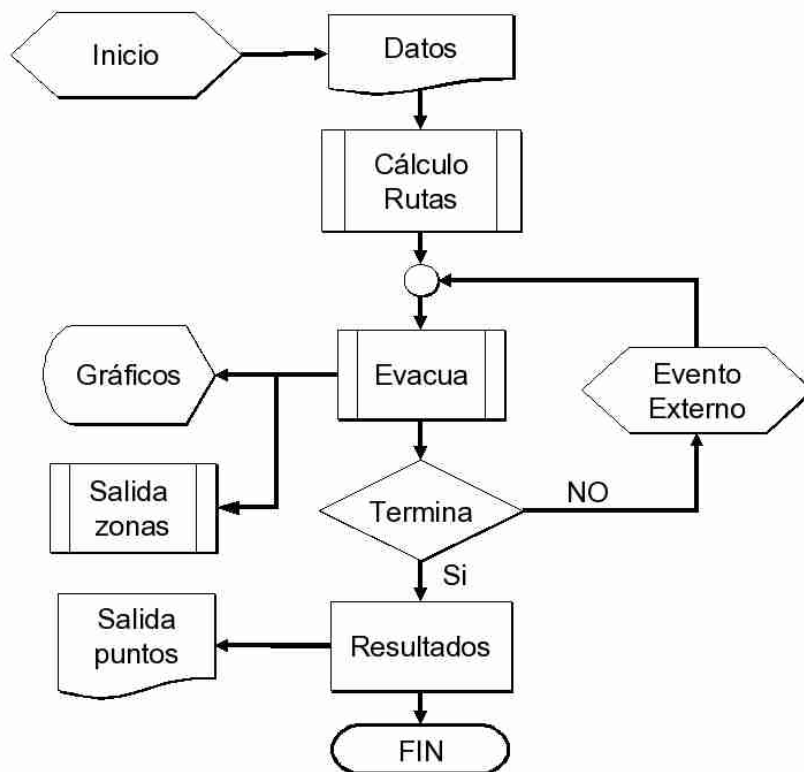


Figura 53: Diagrama bloque del software de evacuación.

El programa está estructurado en dos bloques, el núcleo operativo y la interfase gráfica; cuando se utiliza sólo el núcleo operativo, la velocidad de cálculo se acelera notablemente e, incluso, puede incrementarse el número de objetos *punto* de partida. La interfase gráfica depende de la plataforma utilizada pero se puede prescindir de ella e integrarse directamente en el SIG. Evidentemente, cualquier cambio de plataforma o modificación de las opciones del programa, exige la compilación del mismo.

En la operación se recalculan las propiedades de todos los objetos y después se actualizan de forma simultánea, así se evita que el orden de actualización afecte al resultado. Este proceso se repite hasta que toda la población está completamente evacuada o se supera un tiempo máximo establecido. Esta última opción considera el caso de personas que se queden aisladas y sea imposible su evacuación por el procedimiento convencional. Se ha implementado un algoritmo de búsqueda de caminos para todos los objetos *punto*. Sirve para indicar a cada objeto *punto* cuál es siguiente al que debe dirigirse, para llegar finalmente al *punto* de salida de la red viaria. Estas rutas deben recalcularse cada vez que ocurra una incidencia que deje inutilizada una vía o que quede atascada por el elevado flujo.

```
typedef struct    // variables del objeto PUNTO
{
  bool    sumar;          // calculado controla dirección movimiento
  bool    transfiere;     // calculado autoriza transferencia del limbo
  bool    semaforo;      // calculado permite entrada de personas de otro punto
  bool    alerta;        // calculado avisa de exceso de ocupacion
  bool    sale;          // original es una salida
  unsigned char tipo;    // original tipo de via
  unsigned char vulnera_ceniza; // original vulnerabilidad ceniza
  unsigned char vulnera_flujos; // original vulnerabilidad flujos
  unsigned char vulnera_colapso; // original vulnerabilidad sismica
  short int panico;      // original nivel posible panico
  short int zona;       // calculado numero de zona
  short int buff_s;     // original cruce de salida
  short int id;         // calculado id_via + id_via2 (autonumerico)
  short int id1;        // original numero via
  short int id2;        // original numero auxiliar via
  short int link;       // origina numero enlace
  short int pnt;        // original numero punto
  short int buffer;     // original numero cruce
  short int cruce;      // Creado vía a la se debe saltar
  short int puntero;    // Creado donde esta el cruce al que se va
  short int traza;      // Creado permite seguimiento un punto
  short int pasos;      // Creado contador de pasos;
  short int n_pasos;    // Creado numero pasos para una velocidad
  int    distancia;    // Creado distancia al punto de evacuacion
  double velocidad_max; // original en km/h proviene del mapa.ini
  double velocidad;    // calculado velocidad instantanea
  double capacidad;    // original capacidad de la via
  double habitantes;   // original numero de habitantes asociados
  double en_casa;      // calculado inicialmente igual al nº habitantes
  double en_espera;    // calculado personas listas para evacuar
  double en_circulacion; // calculado personas que estan evacuando
  double limbo;        // calculado variable intermedia transferencia
  double x;            // original coordenada X
  double y;            // original coordenada Y
}VIA;
VIA punto[200000];    // número maximo de objetos puntos
```

*Código 1: Definición del objeto punto: **original** corresponde a valores obtenidos en los ficheros de entrada, **calculado** son valores generados durante la ejecución del programa.*

2.6.1 Entrada de datos y objeto punto

Los datos de entrada corresponden a la estructura comentada en punto 2.4.2 a los que se han añadido dos ficheros con los límites físicos y administrativos del área de trabajo y que se

utilizan exclusivamente para enmarcar la zona en la interfase gráfica. Los ficheros complementarios de límites físicos y administrativos, contienen simplemente las parejas de coordenadas en formato *float*.

Todos los ficheros de datos son de texto (ASCII) para facilitar su manipulación mediante cualquier herramienta software. En caso que el modelo se aplique a una red viaria muy extensa, $\geq 10^5$ *puntos*, puede utilizarse un formato binario mucho más compacto, pero de manipulación más compleja fuera de aquellos programas para los que ha sido diseñado. En la versión para un computador tipo PC con una memoria de 1 GB, la aplicación soporta 100.000 *puntos* sin necesidad de acudir a memoria virtual en disco.

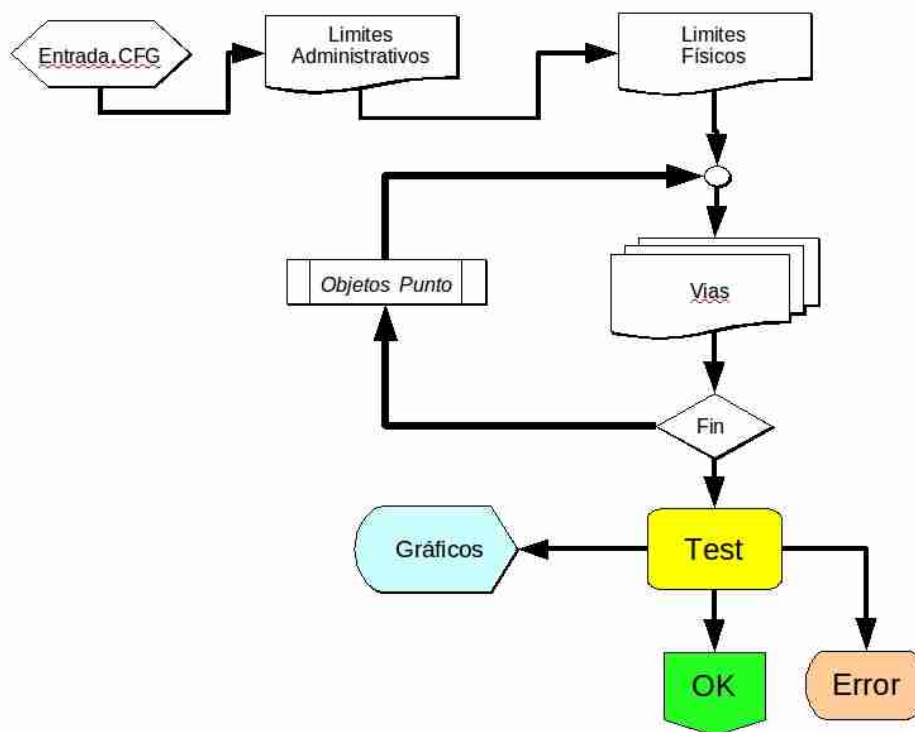


Figura 54: Diagrama de flujo, entrada de datos y carga de los objetos punto.

La primera vez que se procesa el fichero de datos debe comprobarse que están ordenados por el número de vía y *punto* (Id_vía, Id_vía2 y Id_pnt); en caso contrario debe utilizarse una aplicación auxiliar para ordenarlos. Durante la lectura se comprueba que los datos son correctos a nivel de formato y la coherencia y duplicidad de los cruces. Cada fila se lee completa y corresponde a un elemento del tipo objeto *punto* definido por una estructura.

Este objeto, además de servir para almacenar los datos originales, contiene todos los datos intermedios y parámetros de control generados durante el cálculo que definen la evolución del proceso de evacuación para ese *punto*. Se calculan los máximos de velocidad y capacidad para

cada *punto*, valores que se utilizan para el cálculo de la velocidad y personas en circulación en cada iteración. Se calcula el número de población total y por zonas para el control de la evolución de la evacuación.

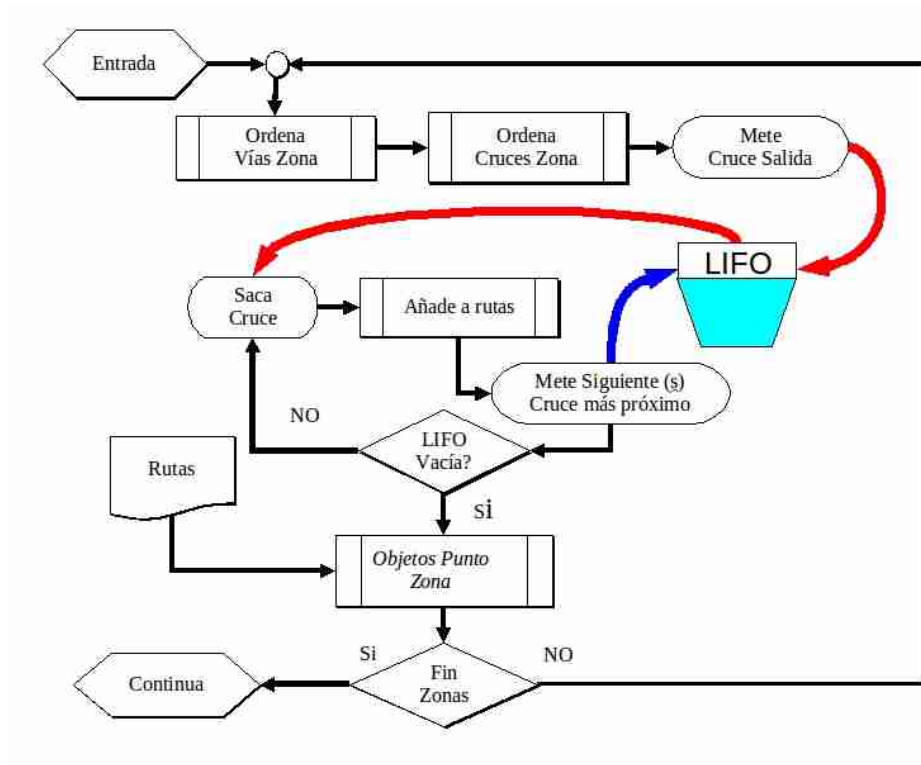


Figura 55: Diagrama de flujo del funcionamiento de la LIFO

2.6.2 Rutas de evacuación, LIFO

Las rutas de evacuación se establecen indicando a cada *punto* el siguiente al que debe dirigirse. Para ello, se parte de las vías que contienen un *punto* de salida, ordenando el conjunto de cruces en función de la distancia a la salida. A partir de este conjunto ordenado de cruces se construye una pila de tipo *LIFO* (last input - first output) que define una red dendrítica que conecta todos los objetos *punto* con la salida. Este proceso se repite para todas las salidas y todas las zonas. Los objetos *punto* de salida intermedios conectan unas zonas con otras. Se utilizan objetos del tipo *StringList* para ordenar automáticamente los cruces en función del tipo de vía y la distancia al *punto* de salida. Mediante un objeto del mismo tipo no ordenado, se construye la *LIFO*. Cuando se procesan todas las vías de comunicación utilizando la *LIFO*, la solución final de las rutas no siempre es la óptima. Quedan objetos *punto* que escogen caminos inverosímiles de salida. Para ordenar este proceso y controlar las evacuaciones ordenadas y dirigidas, se divide el área de trabajo en zonas que agrupan vías de comunicación dependientes entre sí, con un único *punto* de salida común.

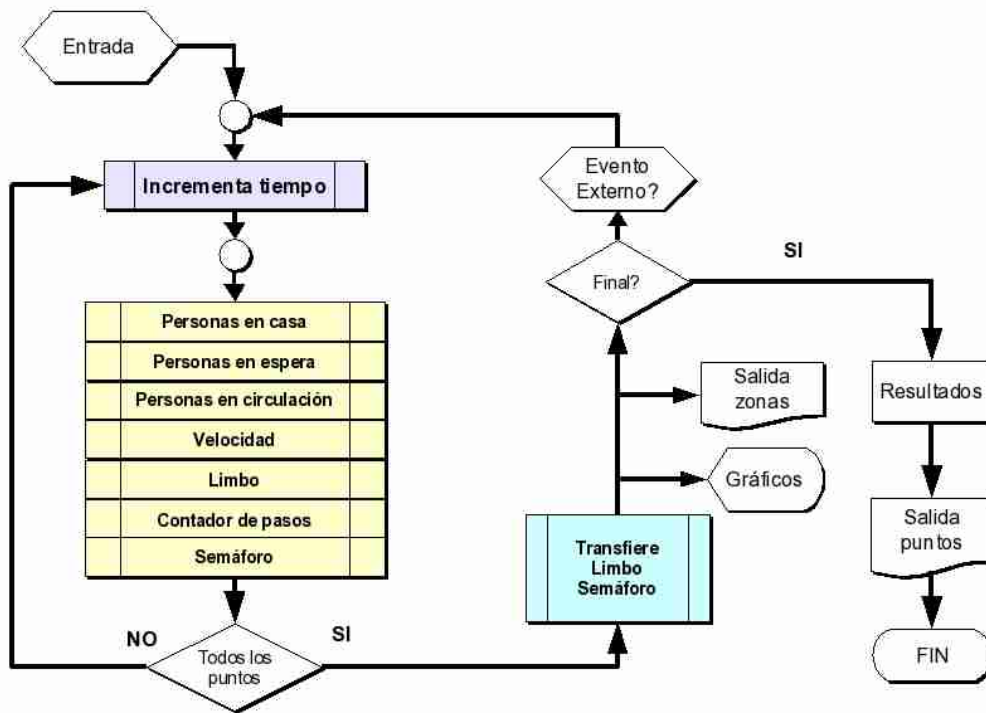


Figura 56: Diagrama de flujo del proceso de evacuación

Este método opera satisfactoriamente en redes irregulares con caserío disperso, cuya morfología tiene cierta semejanza con las redes hidrológicas jerarquizadas. Si se utiliza la división en zonas, se calcula una *LIFO* por zona. Para la implementación de este método se añaden los campos *zona* y *salida* a los datos de entrada. El atributo *zona*, toma el valor del cruce de salida por el que salen todos los objetos *punto* que se encuentren en una misma zona. Dado que se trabaja con objetos *punto* no es necesario que las vías estén al completo incluidas dentro de una misma zona, sino que pueden dividirse. Esta estructura permite realizar la evacuación de forma escalonada.

Con el trabajo descrito anteriormente, se tienen definidas las rutas de evacuación y a la población en sus localizaciones. En el caso de considerar que hay tráfico normal en las vías de comunicación, se lee un fichero que contiene esos datos y se cargan en el campo *en_circulación* del objeto *punto*; en caso contrario, todas las vías se inicializan a cero.

2.6.3 Desplazamiento de la población

Una vez inicializado todos los objeto *punto*, comienza el cálculo del desplazamiento de la población mediante un *bucle* que se repite hasta que toda la población está evacuada o se supera un límite de tiempo establecido. Este proceso se ejecuta mediante tres funciones: *evacua(void)*, *celda(int i)* y *actualiza(void)*.

La función *evacua()* controla el bucle, llama a la función *celda(i)* para todos los objetos *punto*, después llama a *actualiza()* e incrementa la variable que representa el tiempo transcurrido desde el inicio de la evacuación y, si existe interfase gráfica, genera una imagen. Cada cierto número de iteraciones, llama a la función *exporta()* que genera los ficheros informativos de salida. Finalmente, controla las condiciones de fin de la evacuación.

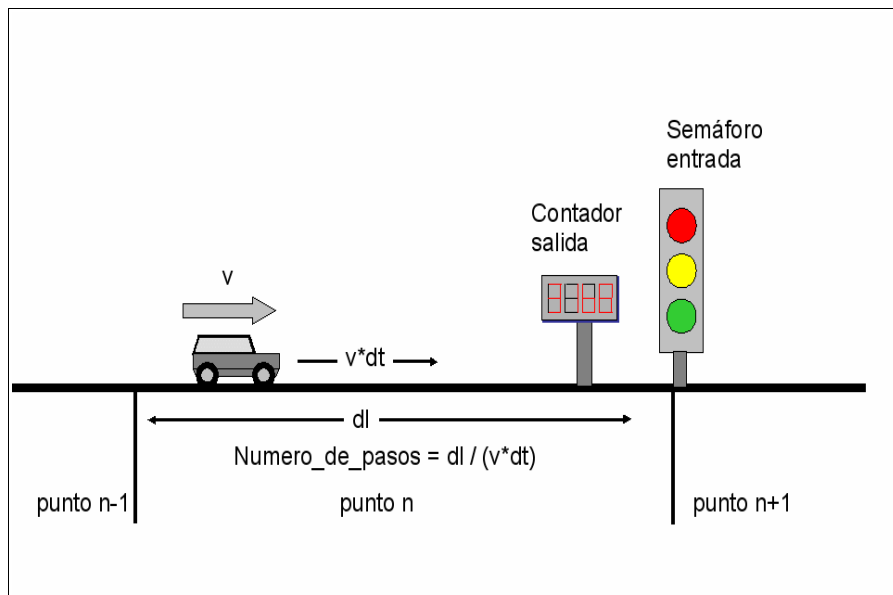


Figura 57: La transferencia de una celda a otra depende de la velocidad por la que se circule por ella. El número de iteraciones necesarias es igual al discretizado espacial dividido por la velocidad por el discretizado temporal $n = dl/vdt$.

La función *celda(i)* actúa sobre el objeto *punto* apuntado por el índice i , calculando sus atributos en función del tiempo transcurrido. Las acciones de esta función son:

1. *punto.zona*: Asigna el orden de evacuación (autonumérico) en el escenario de evacuación dirigida. Un valor negativo impide la salida de las zonas que no serán evacuadas.
2. *punto.en_casa*: Actualiza el número de personas que todavía están en casa preparándose para la evacuación.
3. *punto.en_espera*: Incorpora personas a la espera de ser evacuadas mediante la función que representa el modelo de comportamiento social establecido.
4. *punto.pánico*: Nivel de activación del pánico. Cuando el valor de la función pánico es menor que este valor, todos los habitantes que quedan en casa (*punto.en_casa*) pasan inmediatamente a espera (*punto.en_espera*).

5. *punto.en_circulación*: Número de personas que están evacuando. Si ese número es menor que la capacidad de la vía, se transfieren personas que están *punto.en_espera* a *punto.en_circulación*.
6. *punto.semáforo*: Controla el tráfico de entrada. Cuando el número de personas en circulación está por debajo del máximo permitido, el semáforo está en verde (**true**) y en caso contrario está en rojo (**false**).
7. *punto.velocidad*: En función del número de personas en circulación, la capacidad máxima y tipo de vía, se calcula la velocidad media a la que se recorre la longitud (discretizado) de ese objeto *punto*.
8. *punto.limbo*: Esta variable intermedia se ha introducido para controlar el flujo de personas de un objeto *punto* al siguiente, ya que la transferencia de personas debe hacerse una vez actualizados todos los objetos *punto*, para evitar inestabilidades en el cálculo. El atributo *punto.limbo* toma el valor correspondiente al número de personas que se transfieren en función de la velocidad y capacidad de la vía en ese tiempo. Si al momento de actualizar el limbo está lleno, significa que no ha podido transferirse al siguiente objeto *punto* porque tiene su semáforo en rojo. En el motor de evacuación cada iteración corresponde a un intervalo de tiempo definido por *dt*. De acuerdo con el Teorema del Muestreo, para evitar fenómenos de *aliasing espacial*, este tiempo debe ser menor, al menos que la mitad del tiempo necesario para recorrer el discretizado temporal *dl* a la máxima velocidad. El tiempo necesario para recorrer el espaciado entre dos objetos *punto*, a la velocidad *punto.velocidad* es

$$\Delta t = \frac{dl}{\textit{punto.velocidad}}$$

el cual será distinto en cada *punto*, pues la velocidad, al depender del tipo de vía y del volumen de tráfico instantáneo varía. Para regular que la transferencia de un *punto* al siguiente se realice de acuerdo con su velocidad, se ha incorporado a cada objeto *punto* dos atributos: *punto.pasos* y *punto.npasos*, siendo el primero un simple contador de iteraciones y el segundo el número de iteraciones equivalente al tiempo necesario para recorrer *dl*, definido como:

$$\textit{punto.npasos} = \frac{dl}{\textit{punto.velocidad} \cdot dt}$$

cada vez que *punto.pasos* es mayor que *punto.npasos*, se autoriza la transferencia de *punto.limbo* y se reinicia el contador *punto.pasos*. El número de pasos se calcula en cada iteración. El discretizado temporal *dt* debe ser suficientemente pequeño para que el número de pasos correspondiente a la máxima velocidad de la vía más rápida sea mayor a 2.

9. *punto.vulnera_colapso*: Representa la vulnerabilidad de la vía frente al colapso gravitacional de cualquier tipo de estructura o material situado en sus márgenes

causado por un sismo, fuertes lluvias, vientos, etc. El valor de vulnerabilidad asociado a cada *punto* afecta a la capacidad de circulación en ese *punto*, reduciéndola según el porcentaje de vulnerabilidad estimado.

10. *punto.vulnera_ceniza*: De forma análoga a la vulnerabilidad por colapso, pero activándose en función de la caída de cenizas.

11. *punto.vulnera_flujo*: De forma análoga a la vulnerabilidad por colapso, pero activándose en función de la ocurrencia de lahares, coladas de lava o desbordamiento de cursos fluviales.

La función *celda(i)* permite incluir cualquier otra regla que modifique un atributo del objeto *punto*, bien porque ya existe o bien porque puede surgir en el futuro, en función de las necesidades de la zona.

La función *actualiza()* transfiere el valor de la variable *limbo* de cada *punto* origen al correspondiente *punto.en_circulación* del *punto* destino, siempre que el semáforo de este último lo autorice. Si hay transferencia, se borra el contenido del *limbo* origen. Para ello, utiliza las siguientes propiedades:

1. *punto.sumar*: Indica si el objeto *punto* de destino es el siguiente o el anterior de la misma vía.
2. *punto.cruce*: Indica que el objeto *punto* de destino es un cruce y debe cambiarse de vía.
3. *punto.puntero*: Indica, cuando se encuentra en un cruce, a dónde debe saltar el puntero.

2.6.4 Salida de información

La salida de datos se realiza a intervalos establecidos por el usuario, utilizándose generalmente intervalos variables a fin de no sobrecargar el computador, ya que, cada salida contiene la información de todos los puntos. El formato elegido es el habitual utilizado por las hojas de cálculo, que permite su análisis directo o su importación al SIG en formato raster o alfanumérico. Estos ficheros son tipo ASCII para facilitar su manipulación e incorporación a cualquier tipo de software. Cuando se desea operar con un gran número de puntos o muchas salidas intermedias, es posible utilizar un formato binario *float* o *double* que genera ficheros más compactos. Al terminar, se genera un único fichero de salida que contiene toda la información de las salidas intermedias; de esta forma, es posible analizar fácilmente la evolución temporal de la evacuación en cada punto o vía. Este fichero es de considerable dimensión, por lo que su manejo resulta complicado.

Como opción alternativa, para una inspección rápida, se ha incluido una salida resumen que expresa la misma información sintetizada por zonas. Según necesidades del operador, puede añadirse un cualquier campo al fichero de salida. Las salidas por defecto corresponden a *en_circulación*, *en_casa*, *evacuados*, *en_retención* y *en_atascos*.

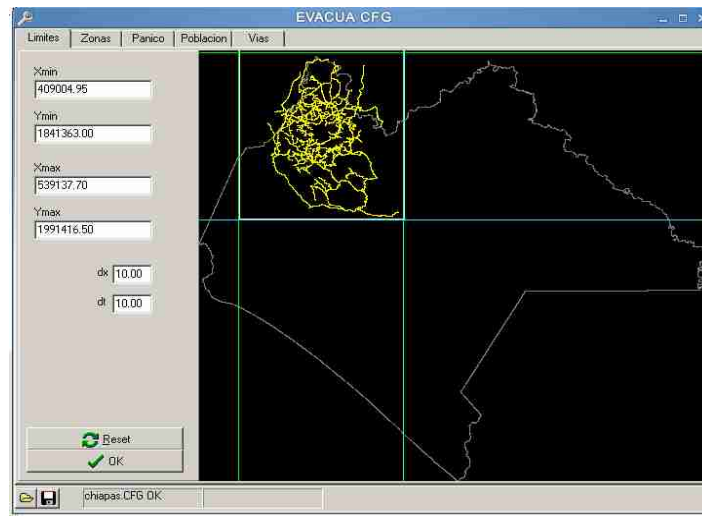


Figura 58: Configuración del área de trabajo

La interfase gráfica es independiente de la plataforma utilizada (Windows, Mac, Linux, etc...) y es útil especialmente en las fases de desarrollo de la aplicación y para el test de los datos iniciales ya que, inmediatamente, se detectan errores en la estructura de la red viaria y especialmente en los cruces. Para su utilización en tiempo real, es preferible desactivarla para disminuir considerablemente el tiempo de cálculo.

```
Xmin 410544.98 Xmax 539137.70
Ymin 1843021.10 Ymax 1992245.50
T1 5400.0 S1 3179.651 R1 0.0
T2 0.0 S2 0.0 R2 0.0
dx 100.00
dt 2.00
velo_p1 10.00 p2 60.00
velo_c1 700.00 c2 4.00
n_velocidades
70
60
...
1
zonas_a_evacuar
421
306
...
331
nivel_pánico
70
END
```

Código 2: Parámetros del fichero de configuración.

2.7 Preparación del fichero de configuración

Se utiliza un fichero auxiliar con extensión *.cfg que contiene: límites del área de estudio, modelo de comportamiento de la población, discretizado espacial y temporal, modelo de

velocidad, tabla de velocidades para cada tipo de vía de comunicación, identificativos de zona ordenadas según prioridad de evacuación y, finalmente, el nivel de pánico. La información para generar los nombres de los tres ficheros de datos (vías, límites administrativos y límites naturales), se obtiene a partir del nombre del fichero de configuración y debe estar en el mismo directorio.

Aunque es posible generar y editar este fichero directamente con un editor de textos ASCII, es suficientemente complejo para requerir la utilización de una interfase gráfica que facilite su manejo. Esta interfase requiere el acceso a los ficheros de datos exportados del SIG; si existe un fichero previo de configuración lo abre para su edición, en caso contrario, lo crea nuevo. La definición del escenario de evacuación se realiza en etapas sucesivas:

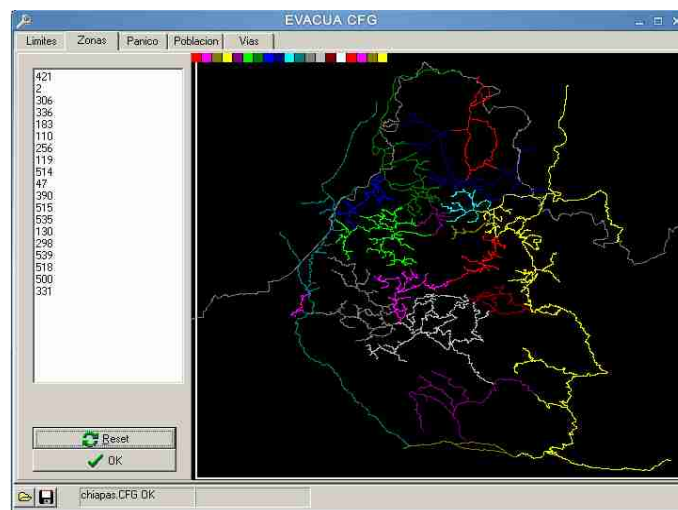


Figura 59: Establecimiento de la prioridad de evacuación

- *Área de trabajo*, selecciona gráficamente las coordenadas de los extremos y se introducen los intervalos de discretizado espacial y temporal.
- *Zonas a evacuar*, se seleccionan y priorizan las zonas definidas en el SIG.
- *Comportamiento de la población*, define los parámetros de la función de distribución que controla el *tiempo de preparación* para la evacuación.
- *Pánico*, define los parámetros del comportamiento de la población ante una situación de emergencia.
- *Velocidad de las vías*, define la velocidad máxima y su variación con el nivel de ocupación para cada uno de los tipos de vía.
- *Vulnerabilidad*, define el nivel de vulnerabilidad para caída de cenizas y actividad sísmica.

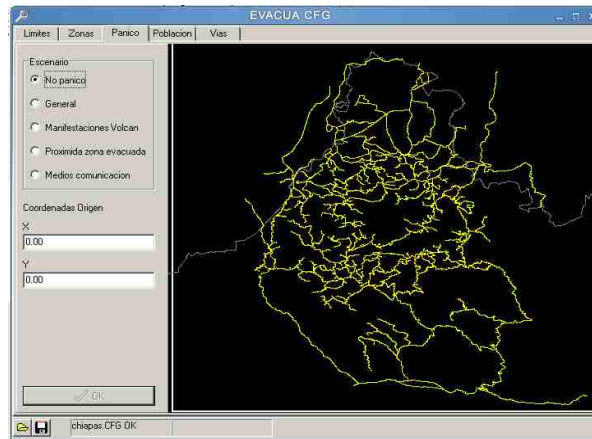


Figura 60: Configuración de la función de pánico

2.7.1 Modelo de velocidad

El modelo de velocidad empleado, a falta de mayor información, utiliza una aproximación lineal en tres tramos, cuyas pendientes y puntos de corte pueden elegirse independientemente. El primer tramo corresponde a la zona de alta velocidad; con densidades de tráfico bajas, la velocidad en la vía es muy próxima al máximo posible. En el segundo tramo la velocidad disminuye rápidamente con el incremento de tráfico; el tercer tramo corresponde a la vía saturada, donde la velocidad cae hasta valores próximos a cero.

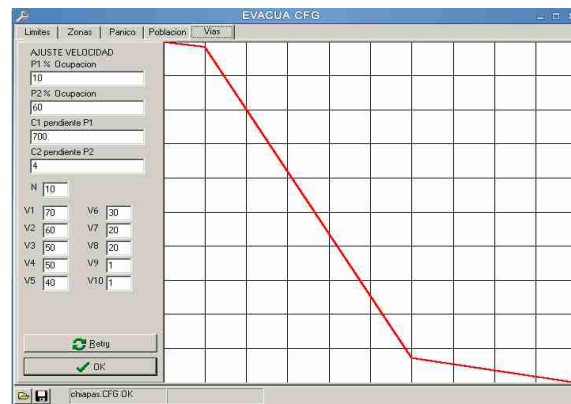


Figura 61: Modelo de velocidades

2.7.2 Modelo de comportamiento de la población

Para el comportamiento de la población se utilizan distribuciones normales; una distribución cuando se considera que toda la población muestra el mismo comportamiento y superposición de dos o más distribuciones cuando la población puede dividirse en varios colectivos (por edad, nivel económico, etc...). En caso de carecer de toda información sobre el comportamiento de la población, se utiliza un valor medio de cuatro horas para establecer el *tiempo de preparación* para la evacuación.

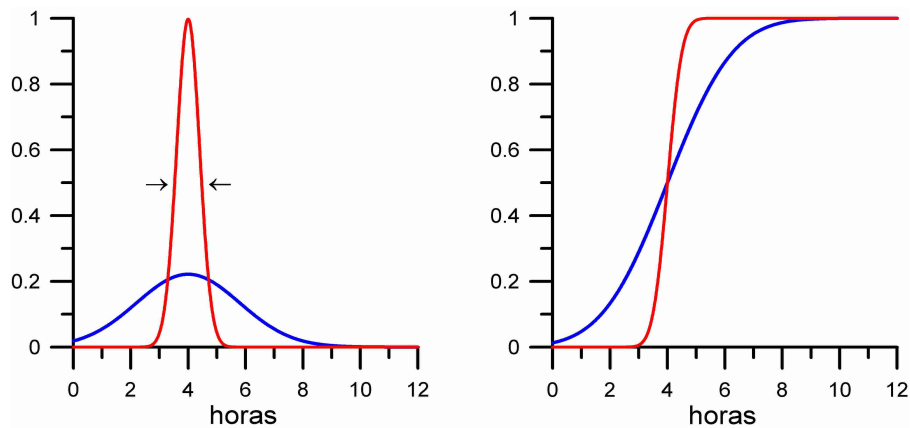


Figura 62: La representación del comportamiento de la población mediante distribuciones normales permite controlar tanto el tiempo medio como la dispersión. La figura muestra dos distribuciones con tiempo medio de 4 horas y dispersiones de 1 y 4 horas

Para el factor pánico se han definido dos opciones relacionadas con el mecanismo de expansión del fenómeno:

- Todo el área afectada cae simultáneamente en situación de pánico. Esta opción se utiliza cuando se carece de otro criterio y, aunque representa un caso extremo, puede corresponder a la propagación de un rumor o a una noticia por los medios de comunicación audiovisuales.
- Se elige un punto a partir del cual se expande el pánico, puede ser el volcán, una zona que se está evacuando o un punto al azar a partir del cual se propaga un rumor. Esta selección se realiza eligiendo gráficamente el punto origen o introduciendo manualmente las coordenadas.

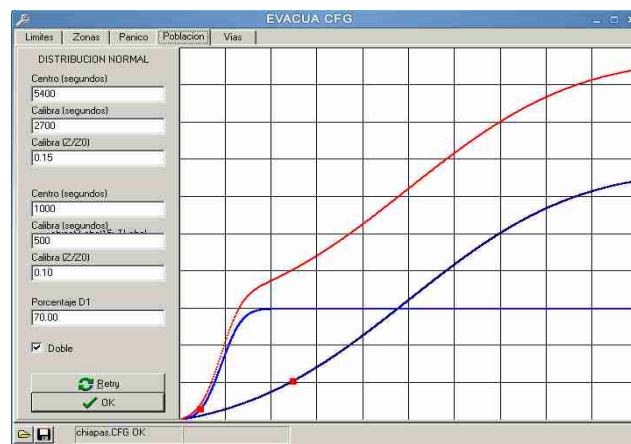


Figura 63: Modelo de comportamiento de la población, que representa el tiempo de reacción y preparación mediante superposición de distribuciones normales.

CAPITULO 3

Aplicación al volcán Teide



Foto Marrero, J.M., 2003.

3 Aplicación al volcán Teide

3.1 Introducción

En la isla de Tenerife se diferencian dos grandes complejos volcánicos, el primero de ellos comenzó su formación hace más de 12 Ma y hoy en día continúa con una actividad volcánica localizada principalmente en las dorsales. La segunda gran formación se localiza en la zona central de la isla y tiene una edad aproximada de 4 Ma. Ésta última se divide en dos grandes estructuras, La Caldera de Las Cañadas, con una edad aproximada que va de 4 a 0.18 Ma, y el sistema volcánico formado por dos estratovolcanes, Teide y Pico Viejo, cuya génesis comienza hace 0.18 Ma y dura hasta la actualidad (Martí et al., 2008b). La isla tiene una altitud máxima de 3718 metros y la parte sumergida alcanza cerca de 3700 metros por debajo del nivel del mar; teniendo en cuenta que la superficie emergida es de 2034 km² el relieve presenta un importante desnivel con pendientes acusadas.

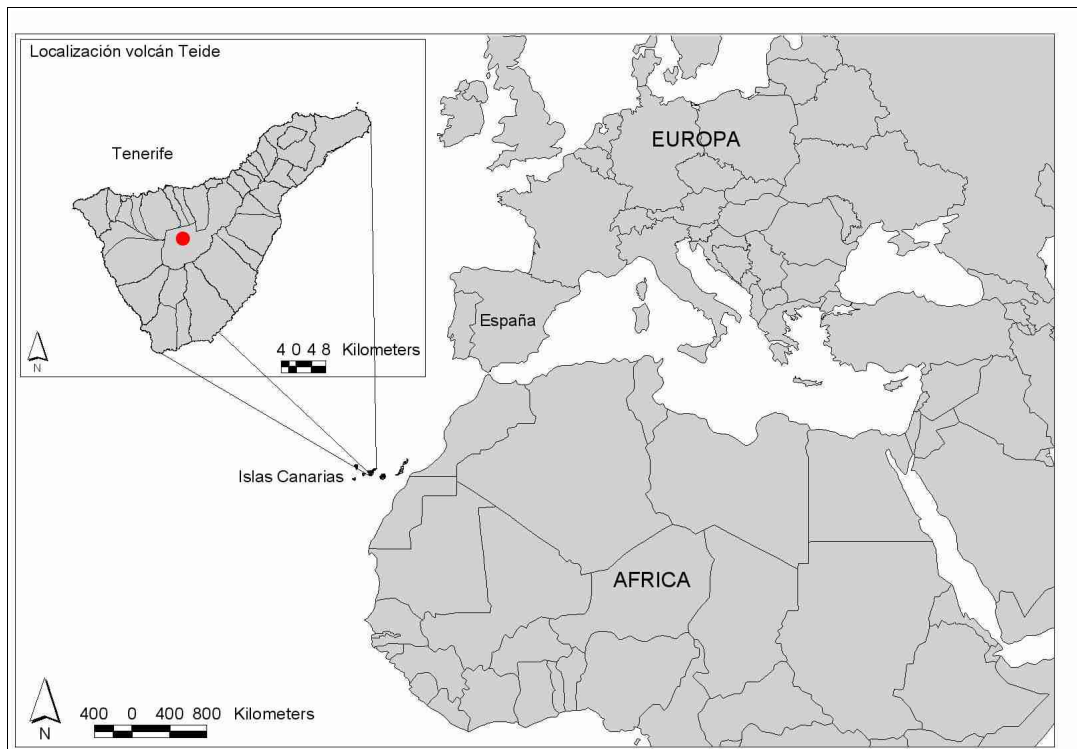


Figura 64: Situación de las islas Canarias, España y localización del volcán Teide, en la isla de Tenerife.

La población nativa que habitaba las islas antes de ser conquistadas por el reino de Castilla, no conocía la escritura ni construía grandes estructuras, por lo que el volcanismo histórico de Tenerife se toma en consideración desde fecha relativamente reciente, a partir de 1493, y sólo tiene en cuenta cuatro erupciones: la triple erupción de Siete Fuentes, Fasnía y Arafo, desde diciembre de 1704 a Febrero de 1705; la erupción del volcán Garachico, ocurrida en mayo de 1706; las Narices del Teide o Chahorra, en junio de 1798 y la del volcán Chinyero, en Noviembre de 1909. De las erupciones anteriores al siglo XVIII existen pocas reseñas y contradictorias y, al menos tres, se atribuyen a una posible erupción en el Pico del Teide; en 1393, 1444 y 1492 (Romero, 1992).

3.2 Características.

El volcán Teide está situado en la zona central de la isla de Tenerife, 28° 16' 34" N y 16° 38' 55" W, y constituye un complejo volcánico formado por dos estratovolcanes y numerosas bocas eruptivas situadas en sus flancos, por ello, se habla del sistema volcánico Teide-Pico Viejo. Su formación comienza hace aproximadamente 180-190 ka, situándose en el borde occidental de la estructura volcánica conocida como la Caldera de Las Cañadas, cuya génesis deriva de tres procesos distintos de calderización que van en sentido suroeste-noreste: Ucanca

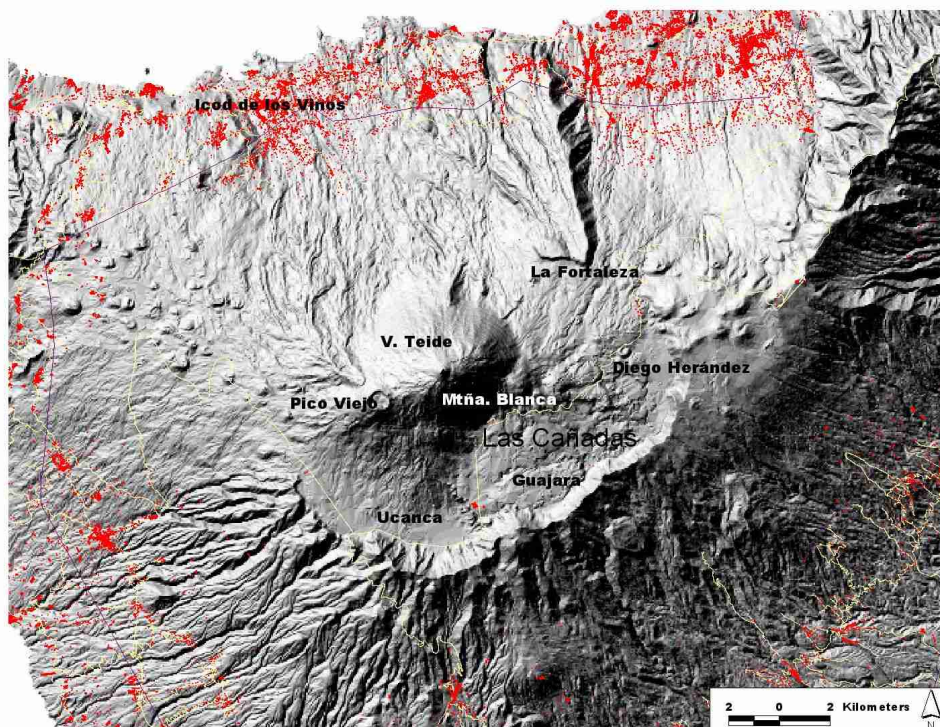


Figura 65: Zona central de la isla de Tenerife, según el modelo digital del terreno del Instituto Geográfico Nacional (IGN) de 25 metros. En el centro de la imagen destaca el volcán Teide y la Caldera de Las Cañadas. Obsérvese las fuertes pendientes del flanco norte del volcán sobre la población de Icod de los Vinos.

1.59-1.18 Ma, Guajara 850-570 ka y Diego Hernández 370-179 ka (Ablay y Martí, 2000), si

bien, otros autores la asocian a un único gran proceso de deslizamiento (Bravo, 1962, Coello, 1973). Los materiales que forman el complejo volcánico Teide-Pico Viejo son lavas que van desde basaltos hasta fonolitas. Las coladas basálticas iniciales y las fases intermedias posteriores, constituyen la mayor parte del material que forma ambos edificios, además de rellenar la Caldera de Las Cañadas con espesores superiores a los 500 metros en algunas zonas. En las fases recientes predominan los materiales más evolucionados. Esta distribución de materiales indica la combinación de magmas, cuya génesis se localiza en profundidad, con la presencia de cámaras magmáticas superficiales; para estas últimas se han establecido varios niveles que van entre 4 y 7 km de profundidad (Martí y Geyer, 2008). La mezcla de magma detectado en los materiales fonolíticos parece confirmarse como uno de los factores que permiten la reactivación de las cámaras magmáticas, mucho más frías que el material joven intrusivo. El hecho de que se reactive una u otra cámara, su forma o disposición y el ángulo de entrada de las inyecciones de magma profundo, podría explicar que las erupciones no siempre ocurran en los conductos centrales sino que, a veces, se sitúen en los flancos (Martí y Geyer, 2008).



Figura 66: De izquierda a derecha, Pico Viejo, Teide y Montaña Blanca, una de las últimas erupciones explosivas ocurridas hace menos de 2000 años (Carracedo et al., 2003, 2007)

3.3 La actividad eruptiva futura.

Tras los cambios detectados en el sistema volcánico central de la isla de Tenerife en 2004, el número de estudios e investigaciones realizadas se ha incrementado notablemente. Entre

ellas, hay de que destacar una serie de trabajos que resumen y ayudan a entender mejor la actividad volcánica que puede tener lugar en un futuro próximo en la isla. Ha sido publicado el árbol de eventos (Martí et al., 2008a), que constituye una de las principales herramientas en la gestión de crisis volcánicas y contempla todos los escenarios posibles que pueden tener lugar. En la isla de Tenerife se diferencian dos grandes sistemas volcánicos según la génesis del magma; uno de tipo basáltico, donde al magma procede directamente de las zonas de generación a gran profundidad y cuyos centros de emisión pueden surgir en cualquier parte de la isla, si bien tiende a concentrarse en las dorsales. En este mismo sistema se incluyen magmas de composición intermedia, procedentes de cámaras situadas bajo el sustrato de la isla. El otro sistema está asociado a magmas muy evolucionados procedentes de cámaras magmáticas superficiales, cuya actividad se ha concentrado en Las Cañadas y cuya zona actual de emisión es el complejo Teide-Pico Viejo.

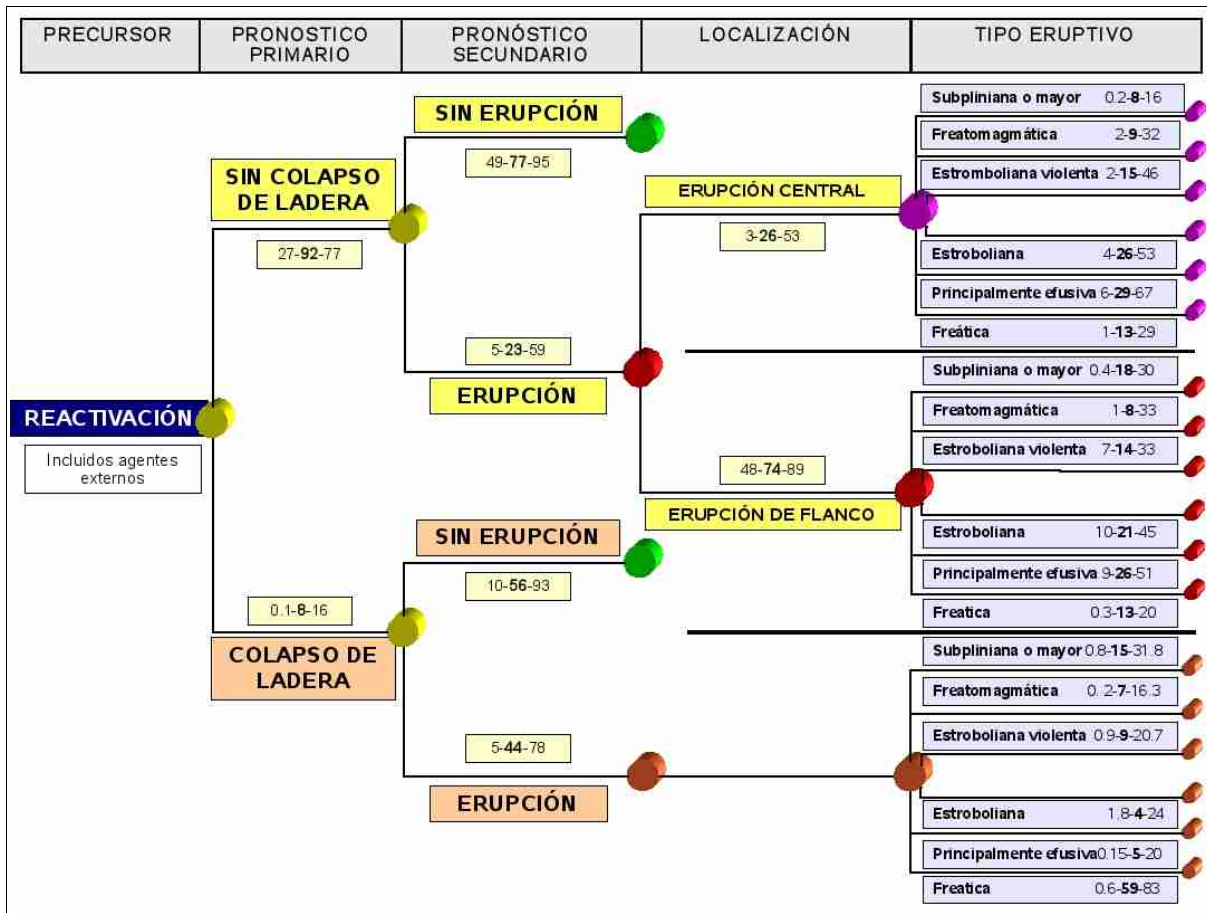


Figura 67: Árbol de eventos para el sistema volcánico Teide-Pico Viejo (modificado en Martí et al., 2008a). Los valores mostrados, indican la horquilla de probabilidad asignada por el grupo de expertos, a partir del método de elicitación, en función de los datos disponibles.

En la isla son frecuentes los afloramientos que muestran procesos de mezcla de magmas, lo que indica que, ambos sistemas, están estrechamente relacionados, considerando al primero como agente reactivador del segundo. Otro aspecto a tener en cuenta, en relación al índice de explosividad de la actividad volcánica de los últimos 35 mil años, es que ambos sistemas han generado índices similares, tanto sobre material basáltico como fonolítico, correspondientes a erupciones de tipo: estromboliana, estromboliana violenta, sub-pliniana y freatomagmática (Martí et al., 2008b), si bien, la evolución natural del sistema Teide - Pico Viejo será la de incrementar notablemente su explosividad. Un análisis pormenorizado de los datos obtenidos durante 2004 y 2005, muestra que el sistema volcánico central de la isla podría haber sufrido una reactivación (García et al., 2006), hay que tener en cuenta que la ausencia de un registro histórico de datos, lo suficientemente amplio, hace que dichas aseveraciones deban tomarse con cautela y no pueda concluirse, en el momento actual, que este proceso acabe en una erupción (Martí et al., 2009). Pese a los datos y estudios realizados, todavía se tiene un conocimiento relativamente escaso sobre la dinámica del sistema volcánico de la isla, al no tener definido claramente el nivel de base y la ausencia de erupciones en fechas recientes, dificulta aún más este proceso. Los trabajos centrados en la datación de las erupciones pasadas indican que el sistema central tiene un periodo de retorno comprendido desde cientos de años hasta los mil o dos mil años. La última erupción explosiva ocurrida se ha datado hace más de 1000 años (Carracedo et al., 2007). Para las erupciones localizadas en las dorsales, el periodo de retorno es de unos cien años.



Figura 68: La Caldera de Las Cañadas. (Foto. J. M. Marrero)

3.4 Aplicación del Cuestionario del USGS.

La cuantificación del riesgo volcánico exige un conocimiento muy completo de la actividad que el volcán ha tenido en el pasado y del grado de desarrollo socio-económico del entorno. El *United States Geological Survey* (USGS), desarrolló en 2005 una metodología para determinar el nivel de amenaza de un volcán, relacionando diversos factores de peligrosidad con otros de exposición. Para los distintos niveles de amenaza obtenidos, se proponen unas recomendaciones destinadas a la mitigación del riesgo (Ewert et al., 2005).

Factores de peligrosidad volcánica	
Tipo de volcán	1
Índice de Explosividad Volcánica Máxima	2
¿Ha tenido actividad explosiva en los últimos 500 años?	0
¿Cual ha sido la actividad explosiva máxima en los últimos 5000 años?	1
Periodo de retorno o recurrencia.	3
¿Ha tenido flujos piroclásticos en el Holoceno?	1
¿Ha tenido lahares en el Holoceno?	1
¿Ha tenido coladas de lava en el Holoceno?	1
¿Tiene potencial para producir explosiones hidrotermales?	1
¿Ha producido Tsunamis en el Holoceno?	0
¿Tiene potencial para generar colapsos sectoriales?	1
¿Puede generar lahares primarios?	0
Actividad sísmica observada.	1
Deformación del suelo observada.	1
Actividad fumarólica o desgasificación magmática observada.	1
Suma total de factores de peligro	15
Elementos expuestos	
Log ₁₀ de la población residente a menos de 30 km del volcán.	5
Log ₁₀ de la población residente aguas abajo o aguas arriba del volcán.	4
¿Ha causado muertos en periodo histórico?	1
¿Han habido evacuaciones en periodo histórico?	1
Aviación local expuesta	2
Aviación regional expuesta	4
Infraestructuras de energía expuestas	1
Infraestructuras de transporte expuestas	1
Áreas muy desarrolladas o sensibles expuestas	1
El volcán ocupa un área importante de una isla poblada	1
Suma total de los factores de exposición	21
Total de factores de peligro x Total de factores de Exposición = Threat Ranking	315
Nivel de amenaza: Muy Ata: 324-124 // Alta: 123-64 // Moderada: 63-30 // Bajo: 30-6 // Muy baja: 6-0	

Pese a rellenar el cuestionario manteniendo un criterio conservador, el nivel de amenaza obtenido para el complejo volcánico Teide - Pico Viejo y para el sistema volcánico en general de la isla de Tenerife es muy alto. Por un lado la peligrosidad, tal como se refleja en el árbol de eventos desarrollado en Martí et al. (2008a), es moderadamente alta, por otro, el incremento de población, el desarrollo socio-económico y el intenso tráfico aéreo registrado en las últimas décadas, han aumentado considerablemente la exposición y la vulnerabilidad.

En Ewert et al. (2005), se hace una serie de recomendaciones para la gestión de la actividad de un volcán en función del nivel de amenaza (*threat*) que representa. Para un volcán de amenaza muy alta, como el Teide, se sugiere que el monitoreo tenga capacidad para seguir la actividad en detalle y en tiempo real, aplicar modelos de interpretación de la situación actual y establecer pronósticos de su evolución. Se propone la instalación entre 12 y 20 estaciones sísmicas en un radio de 20 km del volcán, algunas de ellas deben estar situadas muy próximas. La red incluye estaciones de una y tres componentes, banda ancha, sensores acústicos y acelerómetros. En caso necesario, para mejorar la calidad de los registros, algunas de estas estaciones se instalarían en perforaciones. Para la deformación hay que combinar campañas periódicas de medición con instrumentos de registro continuo (GPS, inclinómetros y dilatómetros) que permitan detectar deformaciones en el espacio y en el tiempo y establecer modelos detallados de la fuente que las genera. También deben realizarse campañas de medición de emisión de gases, incluyendo redes de sensores en registro continuo. En algunos casos, puede ser necesaria la instalación de una red de detección de lahares. Actualmente, es



Figura 69: Ejemplo de mezcla física de magmas en lavas del sistema Teide - Pico Viejo. (Foto R. Ortiz)

posible disponer de información obtenida mediante satélites, que deberá combinarse con la información aportada por los instrumentos instalados en el volcán. De acuerdo con el mismo documento (Ewert et al., 2005), paralelamente a las labores de vigilancia, se debe profundizar en el estudio del volcán (reología, petrología, historia eruptiva, etc.), mediante la cooperación entre instituciones, proyectos de investigación y política de becas a jóvenes investigadores.

3.5 Distribución de la población y red viaria.

Para valorar el impacto del volcán sobre la población se utiliza un método basado en considerar una serie de anillos concéntricos al volcán. Este método permite conocer rápidamente el nivel de amenaza a la que está sometida, sin requerir un conocimiento muy profundo del volcán y, por ello, se utiliza ampliamente. En nuestro caso, se ha aplicado a los tres volcanes estudiados, Teide, Chichón y Popocatépetl, con el objetivo de mantener un marco comparativo entre ellos. Si bien la dinámica e historia eruptiva de cada uno es diferente, los tres tienen valores de peligrosidad altos, tal como queda patente en los distintos trabajos publicados (Macías et al., 1995 y 2005, De la Cruz-Reyna et al., 2001 y 2009, Martí et al., 2008a, 2008b y 2008c, Martí y Geyer, 2008) y en la ficha del USGS (Ewert et al., 2005) que se ha utilizado.

Para la aplicación de este métodos se ha escogido el volcán Popocatépetl, siguiendo el procedimiento descrito en Vidal et al., 1995 que establece un radio de 80 km y mediante un Sistema de Información Geográfica, se cruza con las poblaciones existentes en el momento para determinar el número de personas expuestas. Posteriormente, en Delgado-Granados et al., 2008, comentan la distribución de la población en base a una serie de anillos concéntricos cuyas distancias al centro de emisión⁴ son 10, 20, 30, 40, 80 y 100 km, anillos que hemos cruzado con los núcleos de población utilizando la misma técnica que en Vidal et al. (1995). Aunque los impactos directos más destructores, como pueden ser los flujos piroclásticos, están limitados a menos de 20 km, se considera un radio de hasta 100 km para la caída de cenizas que puede plantear problemas muy serios a la población e infraestructuras. Hay que señalar que el anillo de 100 km engloba las islas de Tenerife, La Gomera y parcialmente Gran Canaria.

Cuando se establecen las zonas de seguridad, habitualmente se representan en un mapa en 2 dimensiones, o sea, no se tiene en cuenta áreas que pueden estar a resguardo de los flujos piroclásticos gracias a la presencia de algún relieve montañoso. El Teide y el Chichón poseen formas de relieve que pueden proteger determinadas áreas, por el contrario, el Popocatépetl se encuentra ubicado en un área abierta. En el caso de la isla de Tenerife, para una erupción volcánica localizada en el sistema Teide - Pico Viejo, la pared de Las Cañadas (Fig. 65) supone un obstáculo protector para la zona este y sureste de la isla, pese a todo, por cuestiones metodológicas y de simplificación, se ha mantenido la metodología de anillos concéntricos.

Las características de los datos estadísticos que proporcionan los organismos oficiales españoles, en relación a los núcleos de población, difieren de los mexicanos en un aspecto importante; los primeros no añaden las coordenadas geográficas, aspecto que dificulta la representación espacial. En España, los datos oficiales sólo están asociados al nombre del núcleo de población y al *diseminado*, que representa la zona próxima a un determinado núcleo pero, donde no existe un continuo urbano, y al que se le ha dado carácter individual en Canarias. Además, los núcleos de población varían de un recuento a otro, por lo que resulta muy complicado mantener un seguimiento espacial de los mismos, salvo que se tenga un

4 Para el volcán Teide se ha utilizado un anillo más, el de 20 km, debido a las dimensiones de la isla. Hay que tener en cuenta que el anillo de 40 km prácticamente cubre la totalidad de la isla.

conocimiento muy detallado de la zona; en unos casos se unen, en otros se separan, según la evolución urbana del área.

Tabla 3.: Distribución de la población por proximidad al centro de emisión del volcán Teide. El **añadido comp.** corresponde al número de habitantes cuyos núcleos de población están englobados por uno de los anillos. El **añadido par.** corresponde al número de habitantes cuyo municipio queda dividido por uno de los anillos.

Distancia (km)	Isla	Población Total	Nº Localidad	Pob. Media	Pob. Máxima	Pob. Mínima	Pobl. >1000 hab	Nº Loc >1000 hab	Superficie km ²
De 0 a 100		2856236	7032	404.75	234174	1	906902	6585	2755.66
10	Tenerife	400	1	-	-	-	400	1	314.14
10 – 20	Tenerife	231678	187	1239.00	31804	2	49043	135	805.84
	(añadido comp.)	+ 20882	+ 83	+ 251.59	+ 3936	1	11582	79	-
	(añadido par.)	16296	36	-	-	-	-	-	-
20 - 30	Tenerife	177823	142	1252.00	16179	23	33836	101	553.39
	(añadido comp.)	9612	43	223.53	1365	5	8247	42	-
	(añadido par.)	20524	40	-	-	-	-	-	-
30 - 40	Tenerife	174516	74	2358	31943	47	14913	36	155.80
	(añadido par.)	13452	11	-	-	-	-	-	-
40 - 80	Global	249389	-	-	-	-	-	-	571.67
	Tenerife	231465	68	3404	166486	2	7365	53	203.86
	(añadido comp.)	12105	7	1729.29	4858	426	2395	4	-
	(añadido par.)	9224	10	-	-	-	-	-	-
	La Gomera	17924	-	-	-	-	-	-	367.93
80 - 100	Gran Canaria	51408	-	-	-	-	-	-	354.53

A nivel de núcleo de población, solo disponemos de una capa vectorial, *no oficial*, para la isla de Tenerife realizada en el año 1996 y de la que se han obtenido las coordenadas de los *centroides* de los polígonos como referencia. Al actualizar los datos con el padrón municipal de 2008, quedan sin asociar 23897 habitantes que residen en los diseminados y 91974 en nuevos núcleos de población respecto a los de 1996. Por consiguiente, hay 115871 habitantes que no aparecen, cuando combinamos el padrón municipal de 2008 con la capa vectorial de núcleos de población de 1996. Para compensar, en aquellos municipios donde *el área de residencia*, no la totalidad de la superficie del municipio, queda completamente englobada en uno de los anillos que define la distancia al volcán, este contingente de población se ha añadido manualmente y, para los municipios que quedan divididos, se ha optado por compensar proporcionalmente el valor de población. Para el caso de las islas de La Gomera y Gran Canaria, comprendidas en los anillos de 80 y 100 km respectivamente, se han utilizado directamente los datos de población municipal que, en el caso de Gran Canaria, resulta un valor de población aproximado dado que, el área que abarca el anillo de 100 km, sólo cubre parcialmente algunos municipios.

En la zona de estudio, el municipio de Icod de los Vinos, isla de Tenerife, la principal actividad económica hasta los años sesenta fue la agricultura y aún se mantenía a principios de los años ochenta como uno de los ejes principales; en 1981 una cuarta parte de la población activa estaba todavía dedicada al sector primario, destacando los cultivos de plátano y viña en la zona de la costa y el policultivo de secano en las medianías (Álvarez-Alonso, 1988). El número de habitantes en 1900 era de 7280 dado lugar a caseríos muy concentrados, ya en 1960 eran 18020 iniciándose el poblamiento disperso, pasando en 1981 a 20230 y en 2007 se ha alcanzado la cifra de 24090 habitantes, según el Padrón del Instituto Nacional de Estadística (INE) y el Instituto Canario de Estadística (ISTAC). La mayoría de la población se asienta por debajo de los 400 metros de altitud, aunque los núcleos situados a mayor cota han ido creciendo progresivamente. El incremento de población está ligado estrechamente al cambio de modelo económico que ha sufrido el archipiélago a partir de finales de los años sesenta, con un abandono progresivo de la superficie agrícola y un desplazamiento de la actividad económica hacia el sector terciario y de la construcción. Esta situación tiene un reflejo importante en el paisaje actual de la isla, se ha incrementado notablemente el número de viviendas y edificaciones construidas, no solo en los principales núcleos urbanos sino también en las zonas rurales.

El carácter disperso del poblamiento tiene, como resultado, una compleja red de comunicaciones en la que se puede distinguir dos redes superpuestas, una heredada y otra actual. La primera corresponde a los antiguos caminos, actualmente asfaltados y recuperados, que comunican la costa con la zona más alta de la isla casi en línea recta, los principales eran los *Caminos Reales*. Esta red obedece al tipo de organización socio-económica, más ligada a la naturaleza que la actual, a las características del relieve y a los procesos históricos que se dieron en la isla. Las vías principales conectaban los pequeños muelles o embarcaderos con los núcleos de población situados a mayor altitud, continuando hasta la zona alta; sin embargo, los caminos paralelos a la costa eran escasos. Debido a la orografía, los valles estuvieron durante mucho tiempo aislados entre sí y las rutas para ir de uno a otro se realizaban desde la cumbre, donde conectaban los caminos reales. Las comunicaciones marítimas en la isla no estaban muy desarrolladas, las características morfológicas de la costa nunca han permitido la creación de muelles importantes y la navegación con embarcaciones pequeñas resultaba complicada y peligrosa, sobre todo en invierno.

Con el desarrollo y expansión del automóvil, la red de comunicaciones sufrió un cambio notable. La red actual posee una distribución horizontal, aunque se ve obligada a salvar importantes desniveles, por contraposición a la antigua que utiliza trazados rectilíneos. El ancho de las vías se ha adaptado al tipo de vehículo de transporte que se ha utilizado en cada momento, obviamente, los caminos más antiguos conservan un ancho de vía estrecho y en muchos lugares tienen puntos de difícil acceso, mientras que los más recientes están adaptados a los vehículos de transporte actuales.

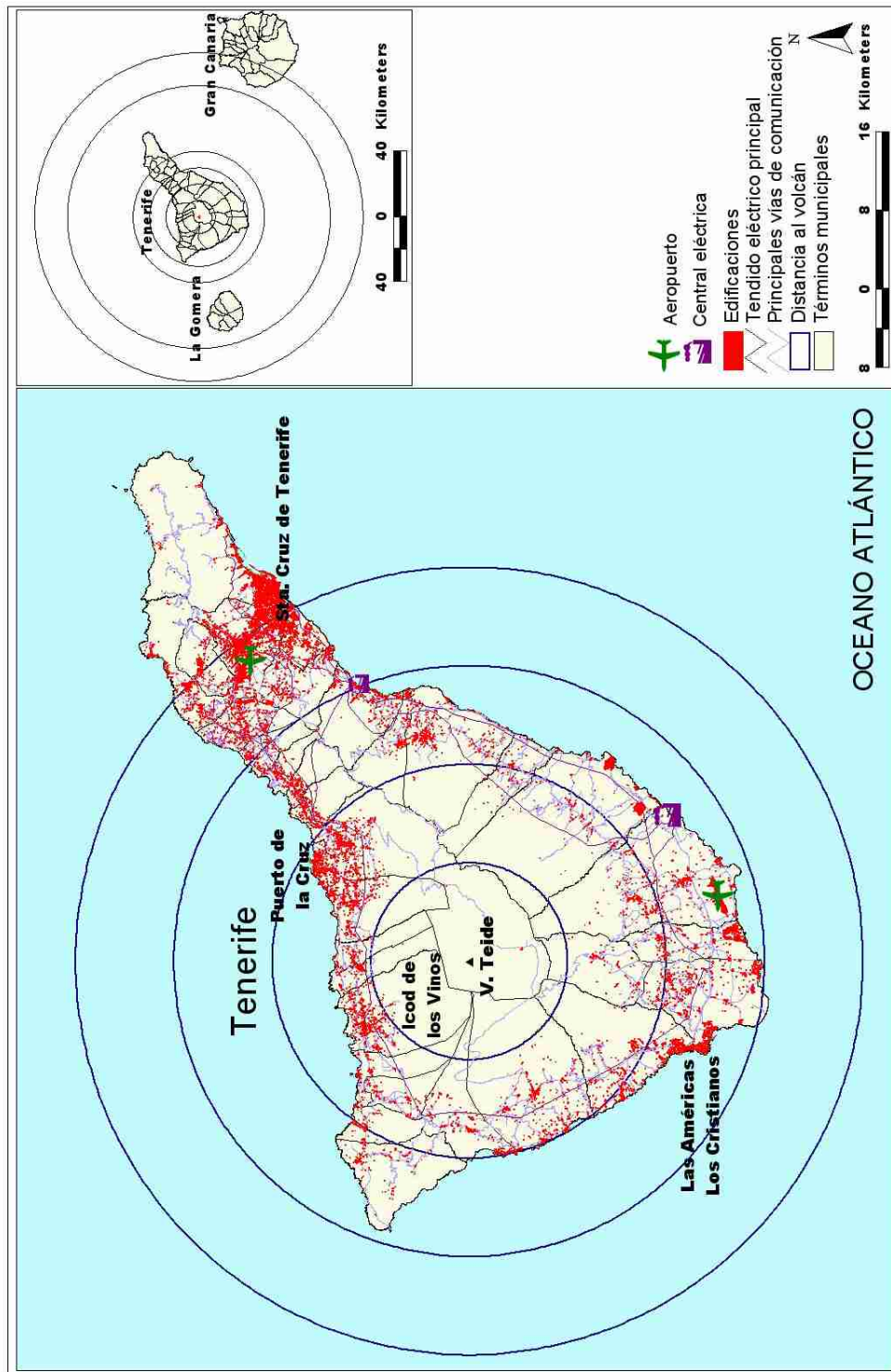


Figura 70: Distribución de la población en función de la distancia al volcán. La máxima distancia alcanzable en la Isla de Tenerife, unos 60 km, corresponde al Macizo de Anaga, situado en el extremo este.

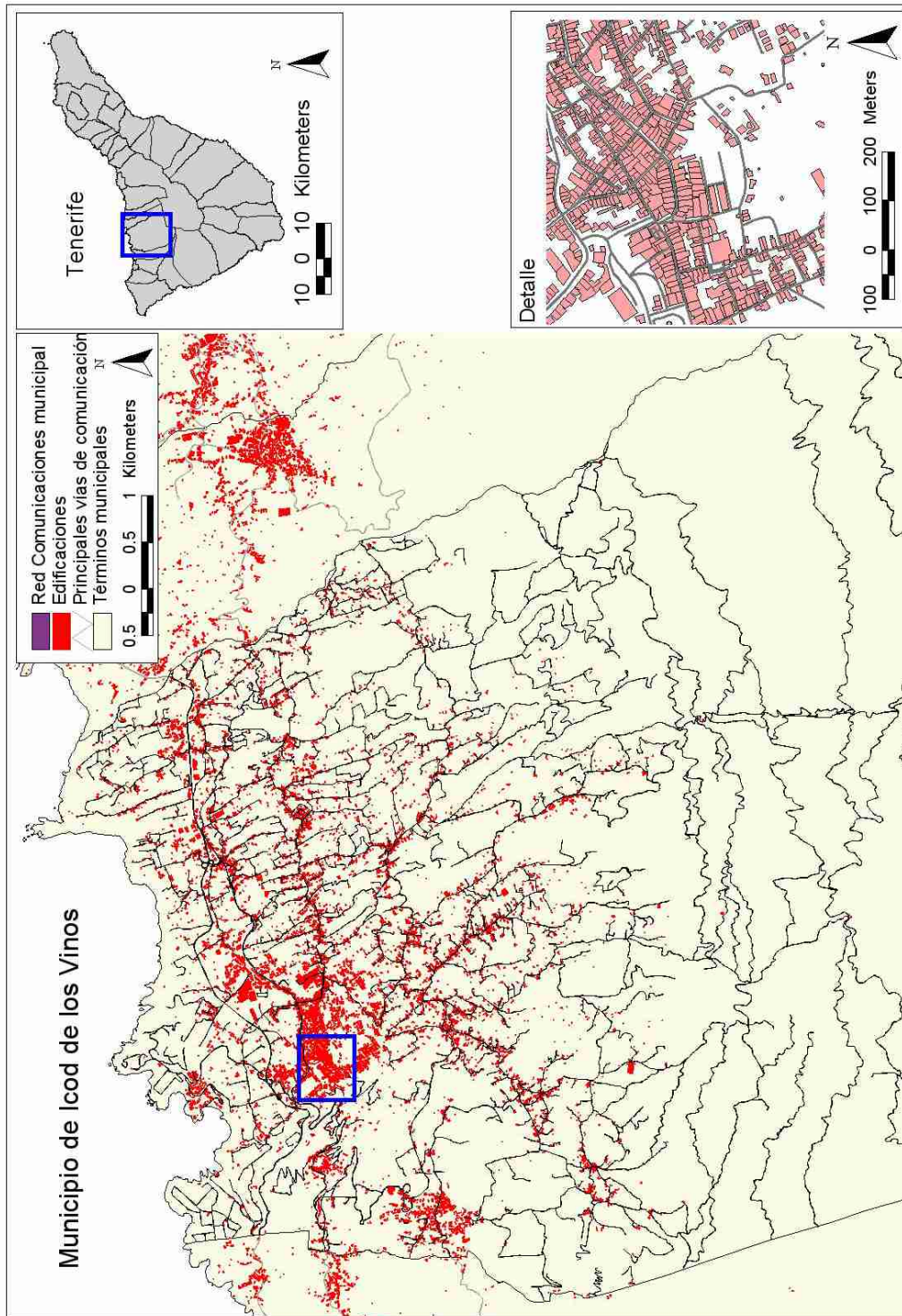


Figura 71: Mapa de localización de la zona de trabajo, el municipio de Icod de los Vinos, con un detalle de la escala de análisis utilizada.

3.6 Plan de Emergencia

En el momento en el que se elaboraba este trabajo, la Comisión de Protección Civil y Atención de Emergencias de Canarias aprobó el Plan Especial de Protección Civil y Atención de Emergencias por Riesgo Volcánico en la Comunidad Autónoma de Canarias (PEVOLCA), (Notas de Prensa del Gobierno de Canarias, 2009). Pese a todo, para su entrada en vigor, el PEVOLCA debe ser homologado por la Comisión Nacional de Protección Civil y, finalmente, aprobado por Decreto del Gobierno de Canarias. Este documento ha sido presentado como un plan de actuación en el que se definen principalmente los grupos, funciones y escala jerárquica de mando y no está dirigido a la población. Queda por redactar los Planes de Emergencia para el riesgo volcánico de casi todas las entidades municipales, que son las que están más próximas al ciudadano y donde se define realmente qué deben hacer las personas que viven en una zona expuesta y quien le puede prestar asistencia. Por tanto, desde el punto de vista práctico, la ciudadanía carece de un Plan de Emergencia que le indique qué debe hacer en caso de crisis volcánica, aspecto que se ve agravado por la falta de educación en ese ámbito.



Figura 72: Flujo piroclástico originado por la fragmentación del frente de colada de lava, debido a un cambio brusco de la pendiente durante la erupción del volcán Teneguía, La Palma 1971 (foto V. Araña).

3.7 Diseño de escenarios de evacuación

Para la aplicación del modelo de evacuación en la isla de Tenerife, se ha elegido el municipio de Icod de los Vinos, pues en él concurren una serie de circunstancias que le confieren un carácter especial para la gestión de una evacuación total del municipio:

- Poblamiento disperso.
- Zona de difícil topografía.
- Compleja red viaria compuesta por caminos antiguos y vías recientes.
- Elevada peligrosidad frente a varios fenómenos naturales
 - avalanchas
 - escorrentías
 - lahares
 - deslizamientos de ladera
 - derivados de la actividad sísmica y volcánica. Las elevadas pendientes predominantes en la zona hacen que una colada lávica pueda fragmentarse y producir un flujo piroclástico.



Figura 73: El volcán Teide desde la zona alta del municipio de Icod de los Vinos, Tenerife. (Foto J. M. Marrero)

En el diseño de los escenarios de evacuación se deben tener en cuenta varios criterios, para que tengan cierta coherencia con la situación real que se vive en el área donde se aplican, independientemente de la existencia, o no, de un Plan de Emergencia. Esto quiere decir que no

sólo hay que generar escenarios en función del Plan de Emergencia vigente, sino que también deben simularse otros escenarios donde entren en juego diversas posibilidades.

En la zona de trabajo existe poca experiencia en la realización de evacuaciones organizadas, y menos aún debidas al fenómeno volcánico, aspecto que incrementa el índice de incertidumbre en relación al comportamiento esperado de la población ante situaciones de crisis, haciendo muy difícil prever con exactitud el resultado final de una evacuación. Los elementos que hemos tenido en cuenta para caracterizar la zona de estudio y que justifican los escenarios propuestos, son los siguientes:

- *Nivel socio-económico de la población;* en este caso destacamos la posesión de un vehículo de transporte propio, por las implicaciones que tiene a la hora de realizar una autoevacuación y porque, en los parámetros que se utilizan para establecer el índice de pobreza, no se tiene en cuenta. Los estudios sobre la pobreza realizados en la isla de Tenerife revelan que cerca de un 25% de los hogares se encuentran por debajo del umbral de pobreza, con un total de 151308 personas afectadas, (ISTAC, 2002). Los datos de 2007 específicos para la zona del valle de Icod, indican que al menos un 27% de los individuos y un 30% de los hogares se hallan en la misma situación por debajo del umbral de pobreza; aspecto que no ha impedido la difusión masiva del automóvil como medio de transporte. En Canarias debido a la orografía del terreno y, en general, a las deficiencias en el servicio de transporte público, la posesión de un vehículo se ha considerado como un bien imprescindible que permite la movilidad entre cualquier punto de la isla. En Tenerife hay censados 695570⁵ vehículos para un total de 865070 habitantes y en el municipio de Icod de los Vinos existen 17480 vehículos de transporte para 24090 habitantes, tal como revelan los datos proporcionados por el Instituto Canario de Estadística (ISTAC) en 2007, a los que hay que añadir los 20500 vehículos que se encuentran localizados en los municipios situados al oeste, San Juan de la Rambla y La Guancha (12570 vehículos) y al este, Garachico, El Tanque y los Silos (7930), cuya influencia sobre las vías principales de comunicación puede ser notable. La experiencia indica que durante las autoevacuaciones en los huracanes, se utilizan entre un 70-80% (Post, 1999) de los vehículos disponibles. La extrapolación a la isla de Tenerife podría darnos una idea aproximada del número de vehículos que se movilizarían en una emergencia.
- *Memoria histórica:* La población de Tenerife tiene escasa memoria histórica y excesivamente tergiversada en relación a la actividad volcánica. El último evento registrado en las Islas Canarias fue en la isla de La Palma, en 1971, con la erupción del volcán Teneguía, que afectó al municipio de Fuencaliente, cuya población según el censo de ese año era de 2031 habitantes. En Tenerife, la última erupción se produjo en 1909, con el volcán Chinyero, y afectó principalmente al municipio de Santiago del Teide, cuyo censo en 1900 indicaba una población de 1585 habitantes (Instituto

5 Los datos mostrados tienen en cuenta la totalidad de vehículos sin distinguir su tipología y uso. No todos pueden ser usados para evacuaciones, sin embargo, el porcentaje es relativamente pequeño si lo comparamos con el cómputo global.

Canario de Estadística, ISTAC). En ambas circunstancias, la dinámica general registrada estuvo entre un VEI 0 o 1, con coladas lávicas, material de proyección aérea y algunos flujos piroclásticos generados por la fragmentación de la lava al caer por pendientes acusadas en el volcán Teneguía. La crisis sismo-volcánica más reciente que se ha registrado en Canarias ha sido en 2004, afectando principalmente al municipio de Icod de los Vinos por ser el área donde se reportaron más sismos sentidos, además de la más expuesta a la actividad que pudiera generar el volcán Teide. Pese a todo, una parte de la población de la isla tiene el convencimiento de que la actividad volcánica es una atracción turística, si bien, para la población residente en la zona más afectada, la percepción del peligro es mayor, aunque siguen existiendo muchos errores de interpretación del fenómeno volcánico.



Figura 74: Proyecto educativo Canarias Tierra Viva, donde un alumno dibuja una isla con un volcán en actividad (Foto: M. A. Llinares)

- *Capacidad de acceso a información para autoprotección:* Hoy en día, puede accederse fácilmente a la información necesaria para establecer una estrategia de autoprotección. Ésto fue utilizado durante la crisis del 2004, periodo en el que los valores de percepción del riesgo, muy asociada al miedo, eran bastante altos. El medio que jugó un papel fundamental fue Internet, fuera del control de cualquier institución pública, destacando un portal en especial, www.todogeologia.com, integrado por un grupo de voluntarios que, junto a aportaciones de científicos, trataron de informar y enseñar sobre el fenómeno volcánico y lo que estaba aconteciendo desde el primer momento. En el Valle de Icod, el porcentaje de viviendas con conexión a Internet en 2004 era de un 17%, mientras que en el 2007 esta cifra ha subido hasta alcanzar un 30% (ISTAC), aspecto que indica la amplia difusión de esta tecnología.
- *Niveles de educación en riesgo y autoprotección.* Muy bajos o casi nulos. No existen planes educativos ni se han realizado campañas institucionales de educación en temas de riesgos naturales y antrópicos. Buena parte de la población desconoce el entorno y las medidas de autoprotección necesarias a nivel general, especialmente en lo referente al riesgo volcánico. Algunas iniciativas puntuales se han llevado a cabo en

Tenerife, como son Viendo con los Volcanes (Sócrates, Comenius I, 00-ESPO1-SO2C1-00628-1) y Canarias Tierra Viva, (2001, Proyecto de Innovación e Investigación Educativa nº51), o jornadas y encuentros llevados a cabo por instituciones, entidades privadas y asociaciones de voluntarios.

- *Interacción entre la comunidad.* Durante el periodo de tensión por la crisis sismo-volcánica existió un nivel alto de interacción espontáneo, pues no estuvo organizada ni dirigida. Sin embargo, debido a la escasa formación de la población, creemos que tuvo pocos efectos positivos a nivel individual, aunque no hay ningún estudio que pueda confirmar este aspecto.
- *Interacción de la agencias de protección con las comunidades afectadas.* No existe esta relación, excepto cuando ocurre una emergencia, y su actuación no siempre es apreciada. Un ejemplo reciente ha sido el último gran incendio que afectó a las islas de Gran Canaria y Tenerife en 2007, donde miles de personas tuvieron que ser evacuadas y hubo un marcado descontento ante la actuación y coordinación de los cuerpos de emergencia, especialmente hacia los gestores de la emergencia (Agencia EFE, 2007). Los planes actuales no contemplan la inclusión del voluntariado, no organizado, como una fuerza activa en la atención de la emergencia, aspecto que se pone especialmente de manifiesto cuando el evento natural o antrópico supera una determinada magnitud y los cuerpos profesionales y voluntariado organizado se encuentran desbordados. En la atención a grandes emergencias debe contemplarse la colaboración ciudadana voluntaria, mediante la integración y asignación de funciones, fuera del área de máximo riesgo.
- *Confianza en el estamento científico y en las agencias de protección.* Es muy baja, pues durante la última crisis, el exceso de protagonismo de algunos científicos, utilizando los medios de comunicación públicos dificultó notablemente las todas las tareas relacionadas con la gestión, incluida la investigación del fenómeno. El comportamiento de las agencias de protección tampoco fue adecuado, su respuesta fue muy lenta y contradictoria. Además, existe un malestar generalizado entre la población por las actuaciones llevadas a cabo recientemente en otras situaciones de emergencia.
- *Existencia de un Plan de Emergencia.* Como se comentó anteriormente, aunque existe un Plan General de Actuación ante una emergencia volcánica, no está todavía oficialmente aprobado y su ámbito de aplicación es regional, sin llegar a definir lo que tiene que hacer el ciudadano en un momento de crisis. Por tanto, a efectos prácticos, su influencia en la población la consideramos nula.
- *Nivel de actividad del volcán.* Para los escenarios desarrollados se ha supuesto que el nivel de actividad volcánica sentida por parte de la población sería notable, teniendo en cuenta que se encuentran muy próximas a los posibles centros de emisión. Este factor tendría un efecto clave a la hora de facilitar o dificultar el proceso de evacuación, al menos en lo que respecta a la toma de decisiones por parte de las autoridades y de la población en general.

Por todo ello, consideramos una población numerosa que, en su mayoría, posee medios propios para desplazarse. No está acostumbrada al fenómeno natural volcánico, solo las personas mayores recuerdan la última erupción ocurrida en el volcán Teneguía en 1971 que se produjo en el extremo sur la isla de La Palma, en un área prácticamente deshabitada y sin consecuencias para la población. También existe una desconfianza manifiesta respecto a las autoridades que gestionan las emergencias, agravada por la mala gestión política que se llevó durante la crisis sísmica de 2004 en la isla de Tenerife. Si además, el volcán presenta un alto nivel de actividad sentida por la población, es muy probable que, incluso antes de dar la alerta oficial, muchos habitantes hayan decidido autoevacuuar. Como ejemplo, en la evacuación llevada a cabo en el año 2000 en el volcán Popocatepetl, México, cerca del 50% de los evacuados lo hicieron por medios propios (Valdés-González et al., 2001).

A pesar que el municipio de Icod de los Vinos posee varios kilómetros de costa, solo cuenta con una pequeña playa, denominada San Marcos, donde podrían operar lanchas de desembarco si las condiciones del mar lo permitieran. En general, en el norte de la isla, el estado del mar durante gran parte del año, dificulta la llegada y salida de la costa que es acantilada, rocosa y de difícil acceso. Estas circunstancias hacen muy problemático llevar a cabo una evacuación por mar en la zona norte de la isla. Por el contrario, la costa sur presenta numerosos lugares apropiados y el estado de la mar es generalmente bueno. En todo caso, a efectos de la simulación, una evacuación por mar se limita a definir puntos en la costa con capacidad proporcional a los medios disponibles. Como referencia aproximada, una lancha de desembarco LCM1-E puede transportar 150 personas y los buques de asalto anfíbio clase Galicia, de la Armada Española, están dotados con cuatro unidades.

Para el diseño de los escenarios se proponen dos opciones en función de las características que podría tener el proceso de evacuación, cada una con variantes para poder establecer comparaciones con los resultados finales y analizar el comportamiento del simulador:

Tabla 4: Tipologías, parámetros y datos generales de las simulaciones aplicadas al municipio de Icod de los Vinos, Tenerife.

Tipo vía	V. km/h	Capacidad	Características
Autopista	120	16 y 100	Doble sentido, dos carriles en cada dirección, no se encuentra en el municipio
Autovía	80	8 y 100	Doble sentido, 1 carril en cada sentido
C. Comarcal	60	4 y 100	Doble sentido, 1 carril en cada sentido
C. Principal	60	4 y 100	Doble sentido, 1 carril en cada sentido
Calle	45	2 y 100	Doble sentido, 1 carril en ambos sentidos
Camino	50	2 y 100	Doble sentido, 1 carril en ambos sentidos
Pista forestal	30	2 y 100	Doble sentido, sin carriles definidos
Peatonal, sendero	5	16 y 100	Doble sentido, sin carriles definidos
Parámetros			
Discretizados Temporal y espacial		Coordenadas del área de análisis	

Discretizado espacial (dx)	10 m.	Xmin	328075.55	Ymin	3127451.90
Discretizado temporal (dt)	0.2 seg.	Xmax	340480.53	Ymax	3143516.10
Modelo C. población 15 min		Modelo C. población 1 h		Modelo C. población 4 h	
Valor Medio (T1)	1000.0 seg	Valor Medio (T1)	3600.0 seg	Valor Medio (T1)	14400.0 seg
Dispersión (S1)	383.02	Dispersión (S1)	1248.48	Dispersión (S1)	4444.72
Fracc. Pobl (R1)	40%	Fracc. Pobl (R1)	10%	Fracc. Pobl.	60%
Se han utilizado tres opciones, bilobulada con 15 minutos y 4 horas, bilobulada con 1 y 4 horas y normal con 1 hora.					
Modelo de Velocidad					
Constante D.V c2	4	Constante D.V. c1	700		
Porcentaje ocupación (p1)	10%	Constante D.V c2	4		
Porcentaje ocupación (p2)	60%				
Datos generales y observaciones					
Población total a evacuar:	19833	Pese a que el censo de población en 2005 era de 24562 habitantes, solo pudieron asociarse a la cartografía 19833. Este valor ha sido considerado como si fuera el 100% de la población.			
Nº total de puntos utilizados:	30939	La red viaria del municipio representa 305.86 km. El nivel de detalle de la cartografía digital equivale aproximadamente a una escala de 1:2000.			
Distribución zonal 1	Contiene 12 zonas. Orientadas hacia una salida localizada en la autovía, dirección este. Representa la dirección habitual de una parte importante del tráfico diario.				
Distribución zonal 2	Contiene 8 zonas. Las salidas corresponden a vías que ofrecen una dirección de salida del municipio. Busca salidas más cercanas, no sigue el patrón diario del tráfico.				
En la simulación no se ha tenido en cuenta la dirección de las vías de comunicación, se asume que todas permiten circular en ambas direcciones. De hecho, la mayoría de las vías cumplen esta condición, excepto en determinados puntos del municipio.					
Los tipos definidos como calles y caminos tienen variadas características: algunos sólo poseen un carril irregular que se estrecha o ensancha, permitiendo la circulación en ambos sentidos, mientras que otros mantienen, con sentidos opuestos, dos carriles bien definidos a lo largo del recorrido. En este trabajo se han considerado como vías homogéneas.					
En las tipologías del viario definidas, todas admiten el tráfico de vehículos, excepto el tipo <i>peatonal-sendero</i> , sólo transitables por personas o animales. Las denominadas <i>caminos</i> corresponden en su mayoría a la red antigua de comunicaciones, que hoy en día han sido asfaltadas y ligeramente ensanchadas en algunos puntos.					
Para la capacidad de las vías de comunicación, a falta de datos, se ha tomado un valor medio aproximado y se ha asignado según el tipo de vía. Los puntos de salida se asumen como lugares de tránsito, no de control. Se les asigna capacidad ilimitada para que no generen retenciones.					

En cada distribución zonal se ha aplicado la misma función de comportamiento de la población a todas las zonas. No existen datos reales que permitan definir las funciones de comportamiento para los habitantes de las zonas de estudio. Para comparar los resultados obtenidos, en cada simulación se ha variado la función de comportamiento de la población en base a estimaciones derivadas de nuestra experiencia.
Los valores de <i>circulación lenta</i> se toman en consideración cuando se alcanza el 70% de capacidad máxima de la vía de comunicación.
Los escenarios corresponden a evacuaciones realizadas antes de que comience el fenómeno eruptivo.
Escenarios definidos
1. Autoevacuación no organizada por zonas con población no preparada y actividad volcánica sentida. Se han utilizado las distribuciones zonales 1 y 2, siempre en simultáneo y con dos funciones distintas de comportamiento de la población: bilobulada de 15 minutos y 4 horas y bilobulada de 1 y 4 horas. Capacidad y velocidad variable en función del tipo de vía. No hay una alerta oficial pero el incremento de la actividad volcánica sentida dispara una autoevacuación. Una parte de la población actúa rápidamente, otra tarda más en reaccionar. Se utilizan las distribuciones zonales 1 y 2 para comparar los resultados, la primera representa la tendencia habitual del tráfico, mientras que la segunda corresponde a una opción alternativa en la que se busca la salida más próxima. Ambos casos pueden darse.
2. Autoevacuación controlada y dirigida con población preparada. Se aplica sobre las distribuciones zonales 1 y 2, en simultáneo y secuencial con una función de comportamiento de la población: normal de 1 hora. Capacidad y velocidad variable en función del tipo de vía. Se da la alerta con antelación al momento de la evacuación, la población está preparada y se incorpora en un corto espacio de tiempo.

Para cada una de las zonas propuestas se han aplicado cuatro simulaciones distintas en función de los escenarios comentados con anterioridad. Los resultados obtenidos se muestran mediante gráficas que representan la evolución de la evacuación:

- Evolución de las llegadas al punto de destino o salida.
 - Evolución de las personas preparadas para evacuar.
 - Evolución de las personas que están en espera para incorporarse a la evacuación.
 - Evolución de las personas que están circulando.
 - Evolución de los puntos de velocidad reducida.
 - Evolución de los puntos donde se producen bloqueos.

Estas gráficas se presentan globalmente y para cada una de las zonas contenidas en las *distribuciones zonales*. Para facilitar la interpretación de los datos y la comparación entre las simulaciones, se presentan primeramente las gráficas correspondientes al escenario 1 y, a continuación, el escenario 2.

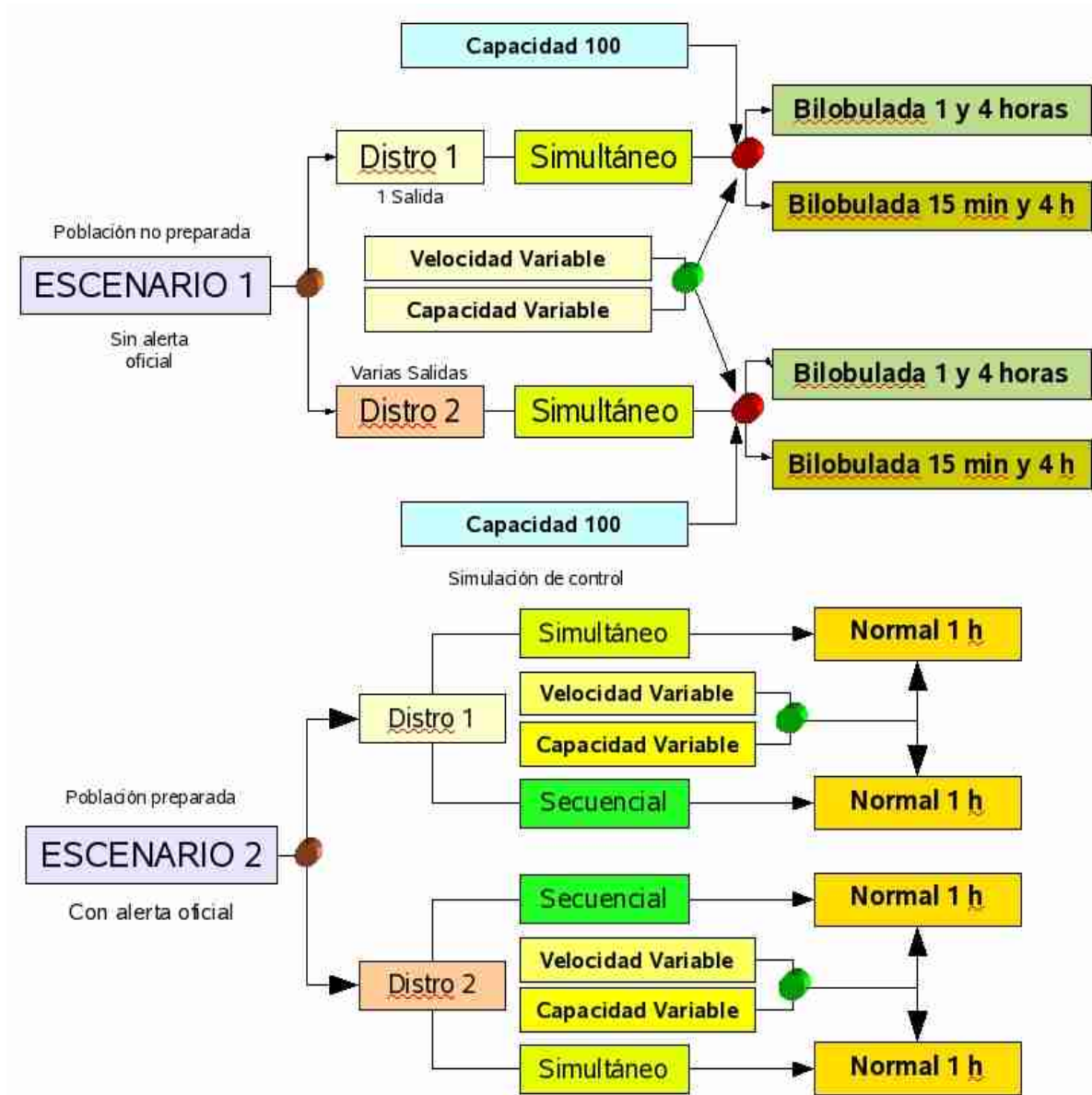


Figura 75: Esquema de simulación para el municipio de Icod de los Vinos, Tenerife, próximo al volcán Teide. Las simulaciones corresponden a autoevacuaciones, con capacidad variable de las vías de comunicación. Se han añadido simulaciones puntuales con capacidad homogénea para comparar los resultados y observar el comportamiento del modelo.

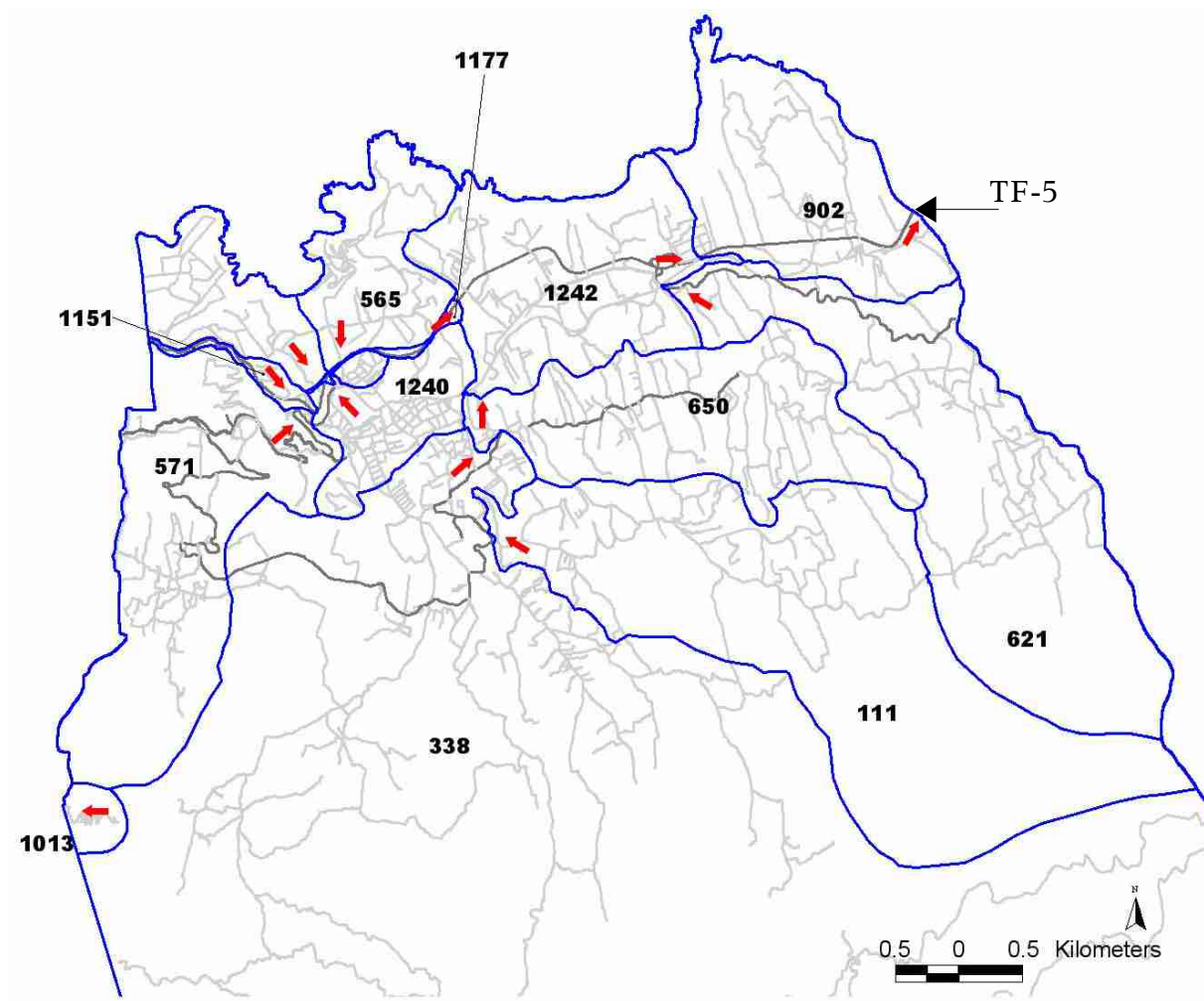


Figura 76: **Distribución Zonal 1.** Esta distribución se adapta a la tendencia habitual del tráfico diario, que confluye en la vía principal situada en la zona norte del municipio. La salida se realiza en dirección este, hacia Santa Cruz de Tenerife, capital de la isla. Los números de zona corresponden al valor del cruce de salida que poseen.

Tabla 5: Número de zona, superficie y población contenida.

Zona	Área km ²	Pob.	Zona	Área km ²	Pob.	Zona	Área km ²	Pob.
111	6.69	898	621	5.01	483	1151	0.14	4
338	68.41	4429	650	2.92	2833	1177	0.06	0
565	1.39	1366	902	2.51	1166	1240	1.96	4787
571	3.42	1312	1013	0.20	0	1242	2.64	2555

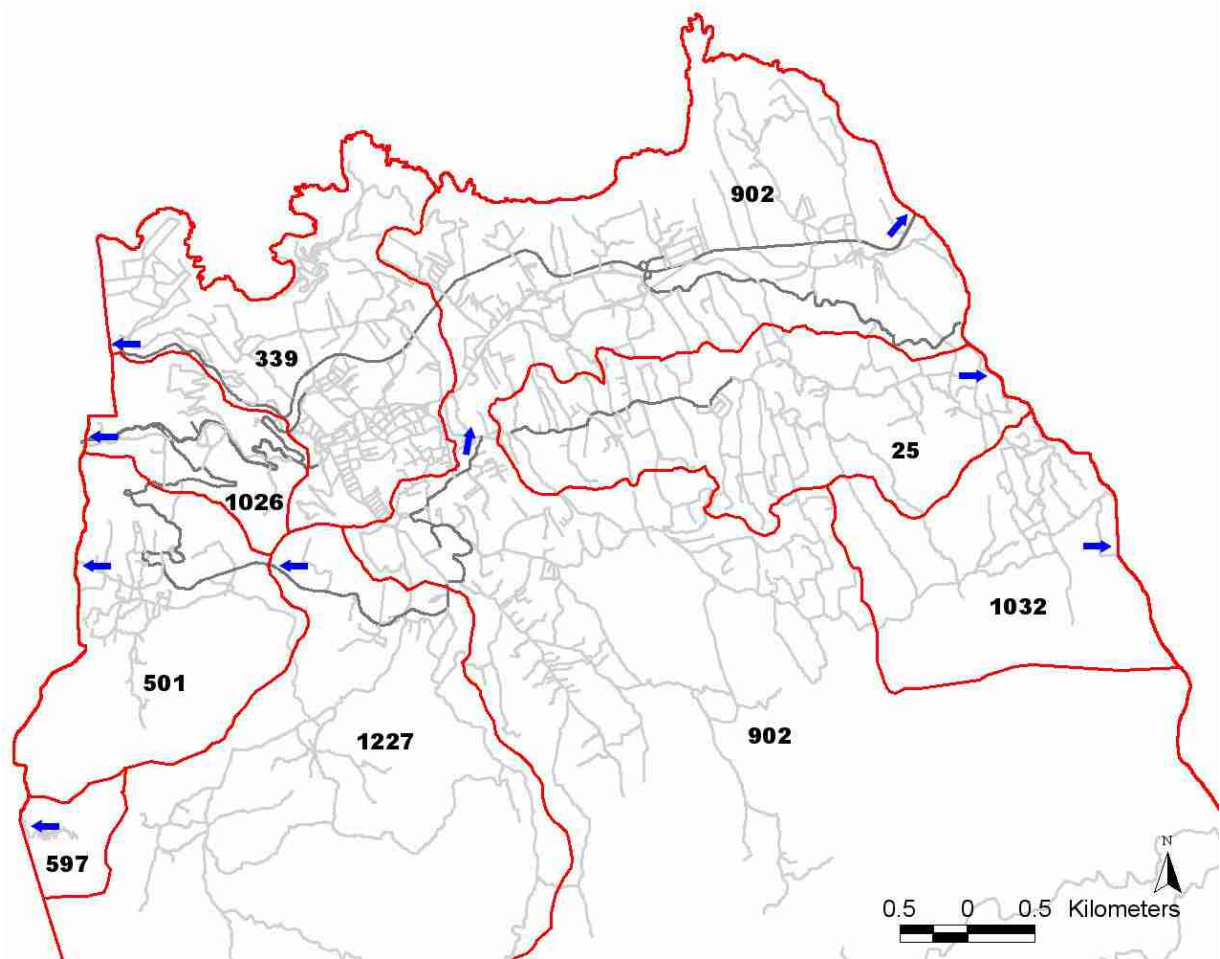


Figura 77: **Distribución Zonal 2.** Esta distribución busca la salida más próxima al lugar de residencia en función de la localización de las principales carreteras. La salida se realiza en dirección este y oeste en el supuesto de que la zona de destino estuviera situada en el sur de la isla. Los números de zona corresponden al valor del cruce de salida que poseen.

Tabla 6: Número de zona, superficie y población contenida.

Zona	Área km ²	Pob.	Zona	Área km ²	Pob.	Zona	Área km ²	Pob.
25	3.75	2516	597	0.48	0	1032	3.16	55
339	3.85	7416	902	69.97	7272	1227	9.72	1183
501	3.16	855	1026	1.28	536			

3.8 Modelización

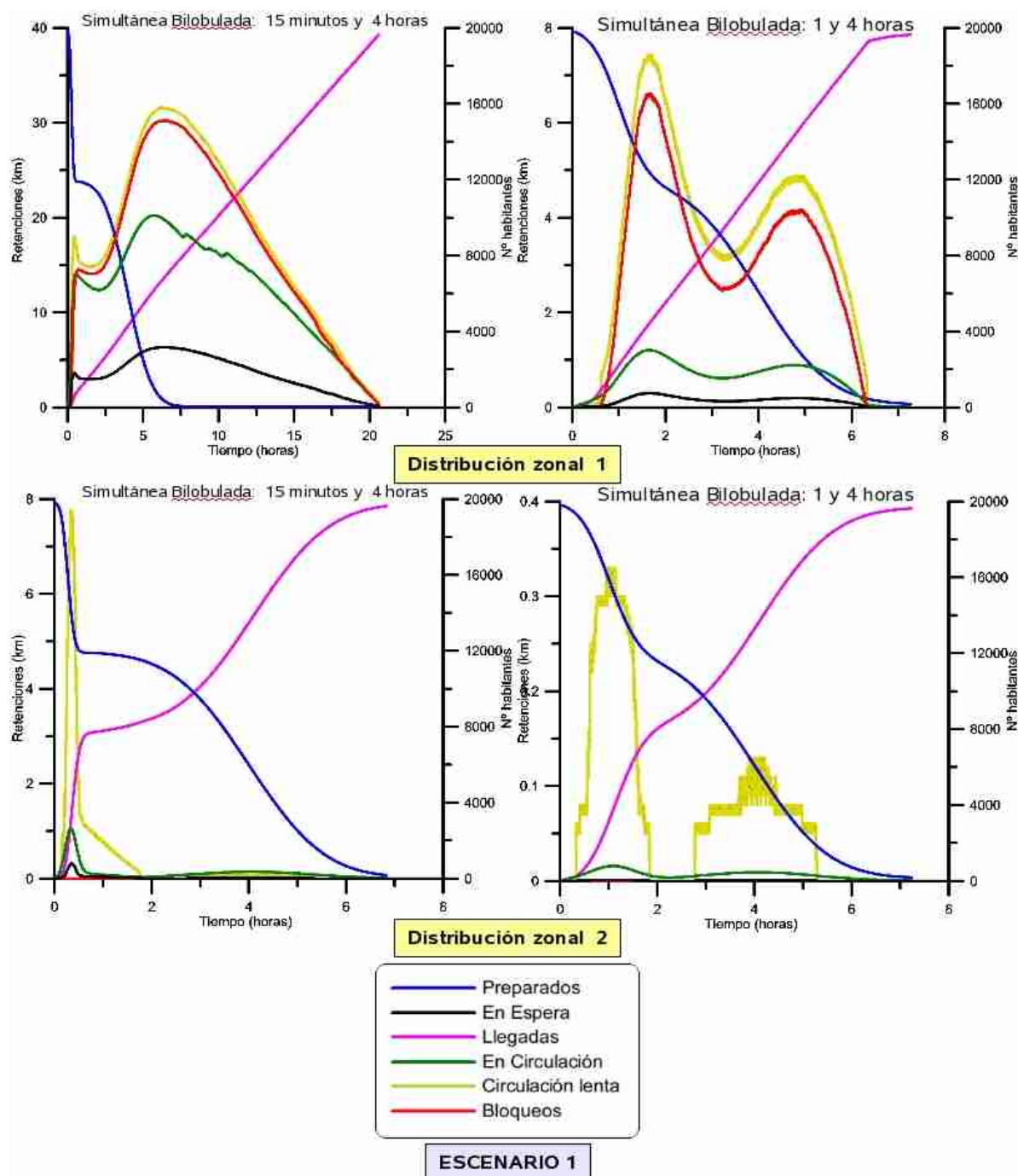


Figura 78: Representación gráfica del escenarios 1, con variación en el tiempo medio de incorporación. Datos globales de llegada al destino, personas preparadas para evacuar, circulando, kilómetros de vías con circulación lenta y kilómetros de vías con bloqueos.

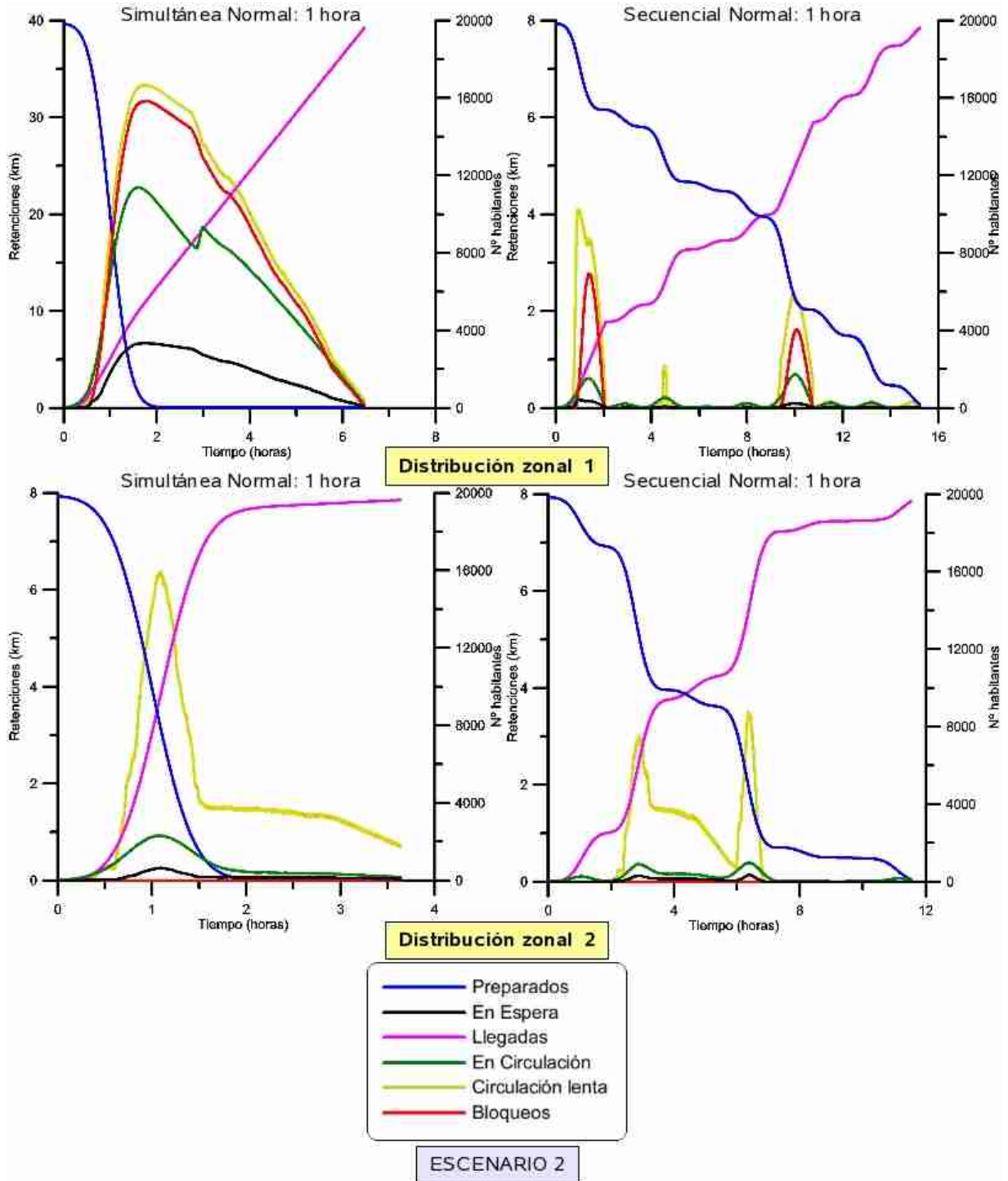


Figura 79: Representación gráfica del escenario 2, con variación en el tiempo medio de incorporación. Datos globales de llegada al destino, personas preparadas para evacuar, circulando, kilómetros de vías con circulación lenta y kilómetros de vías con bloqueos.

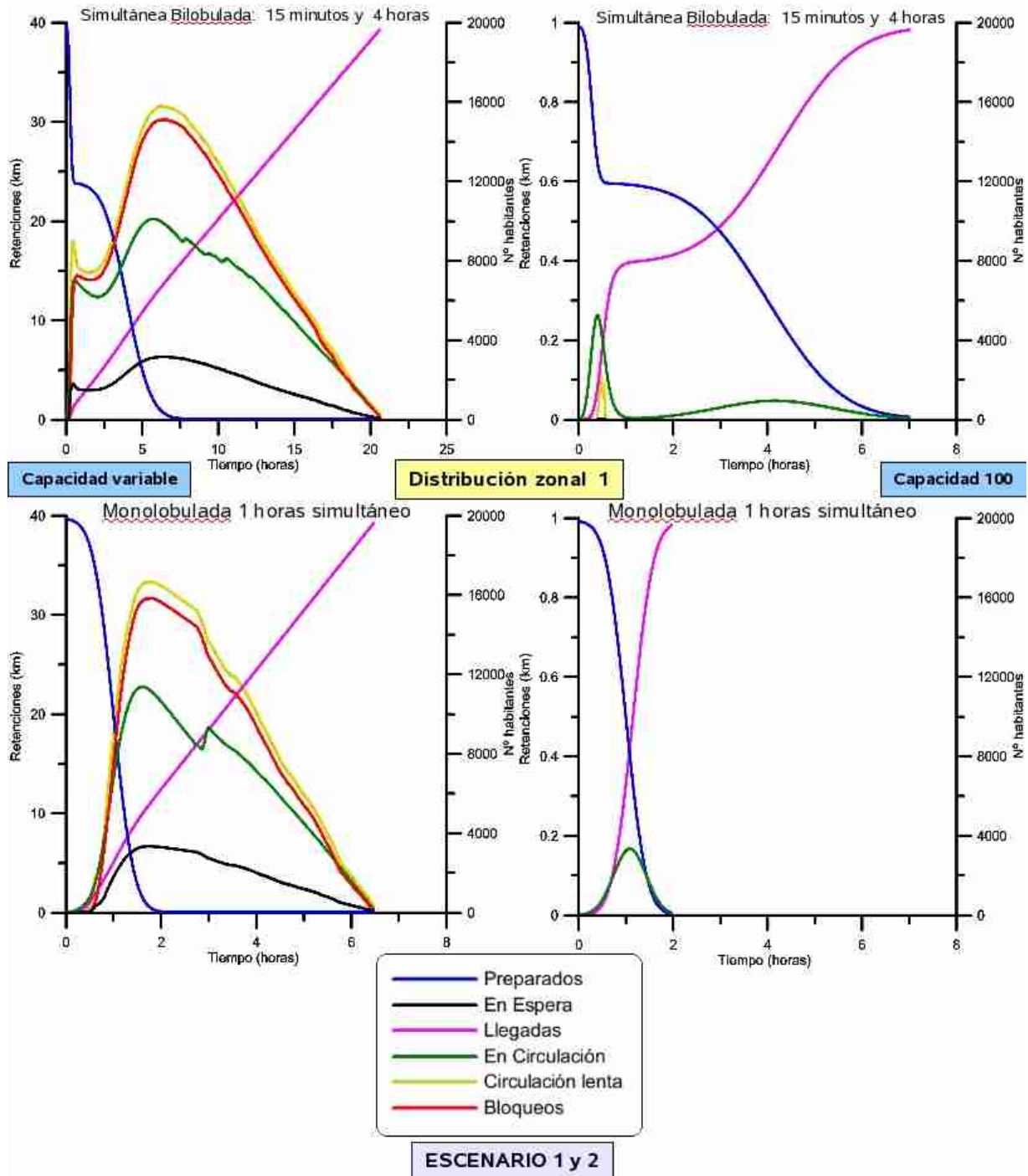


Figura 80: Para observar la respuesta del modelo ante las retenciones, se han repetido las simulaciones de la distribución zonal 1 con bilobulada de 15 minutos y 4 horas y monolobulada de 1 hora con incorporación en simultáneo.

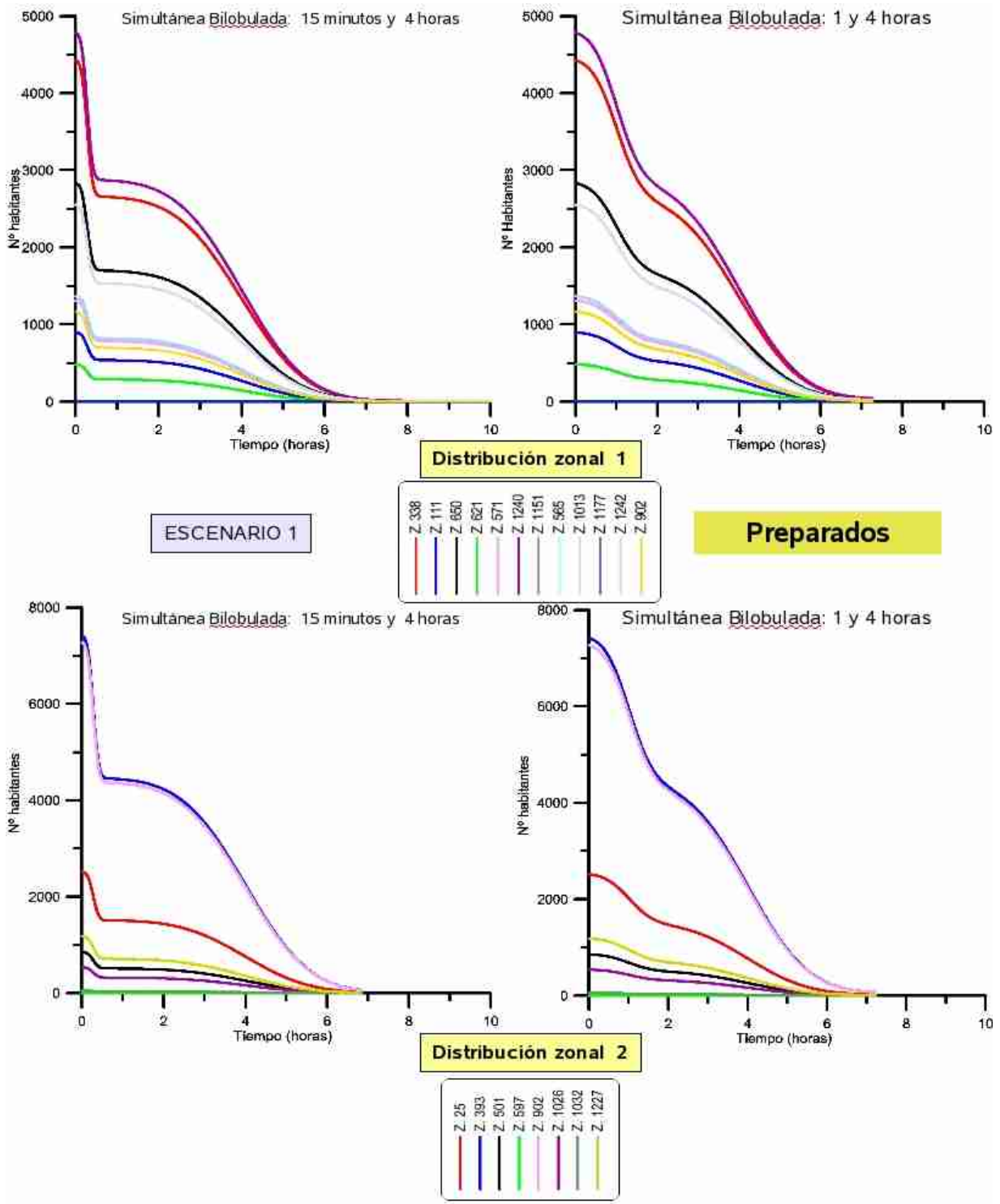


Figura 81: Funciones de comportamiento de la población para el escenario 1.

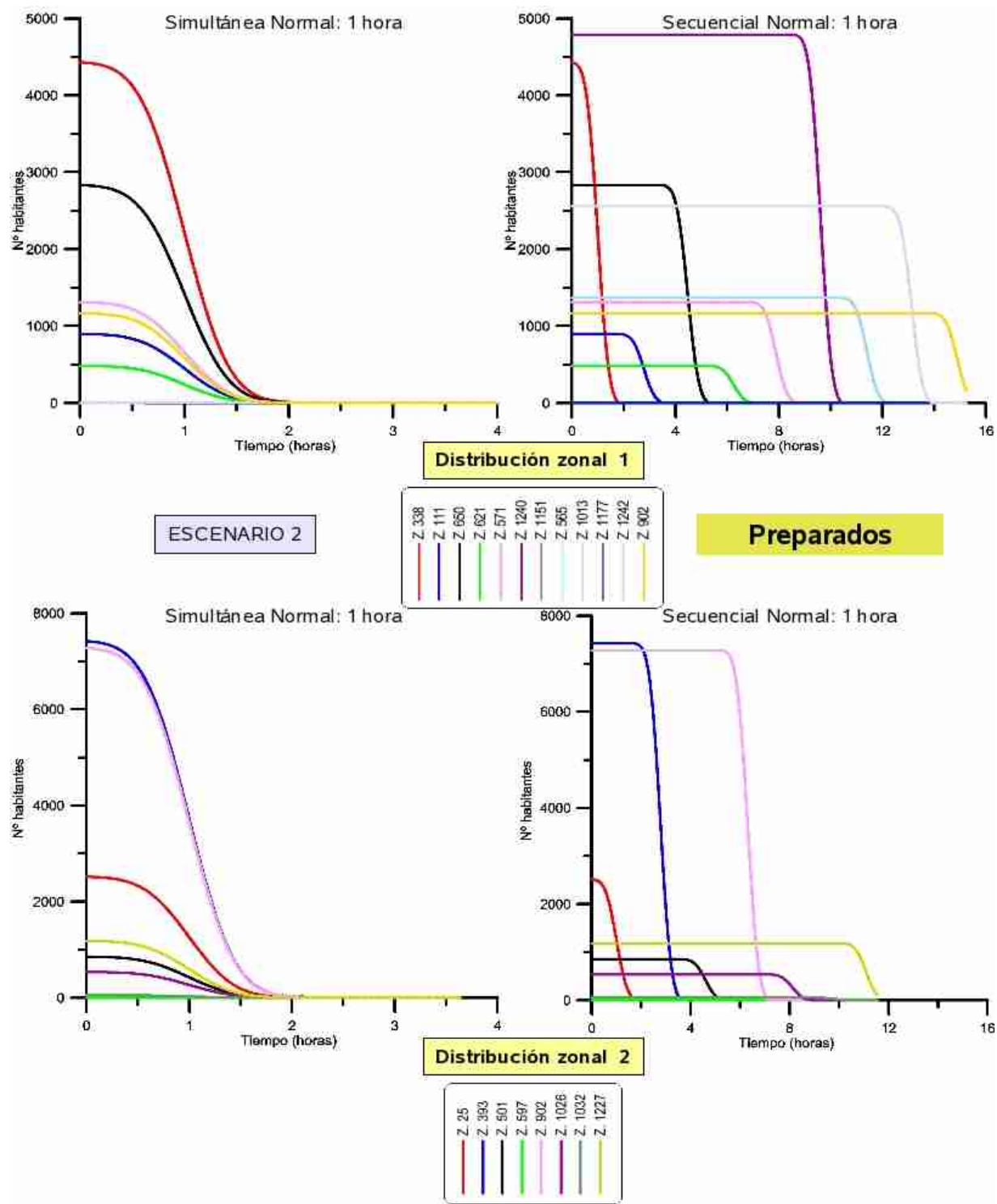


Figura 82: Funciones de comportamiento de la población para el escenario 2.

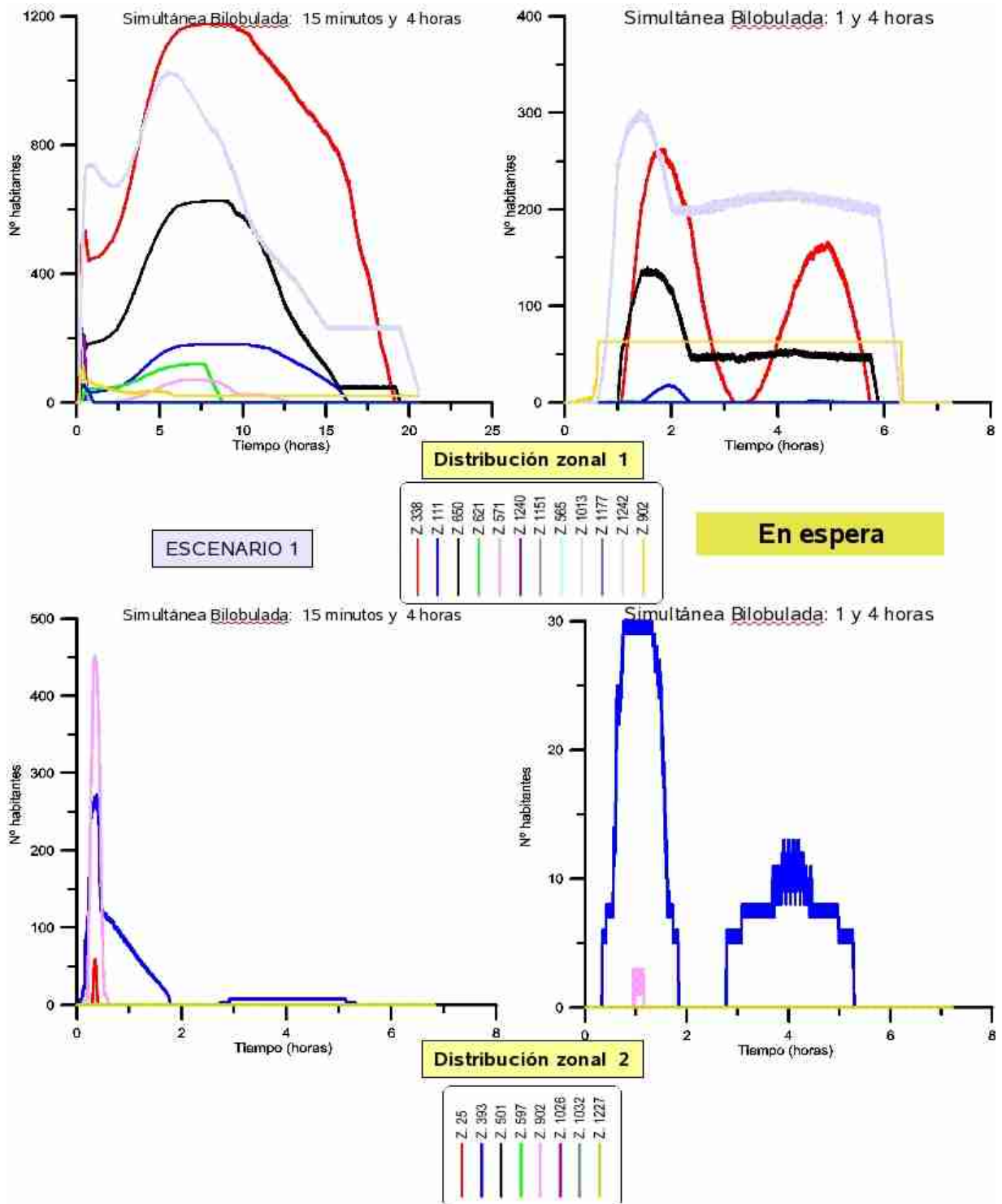


Figura 83: Número de personas en espera para el escenario 1.

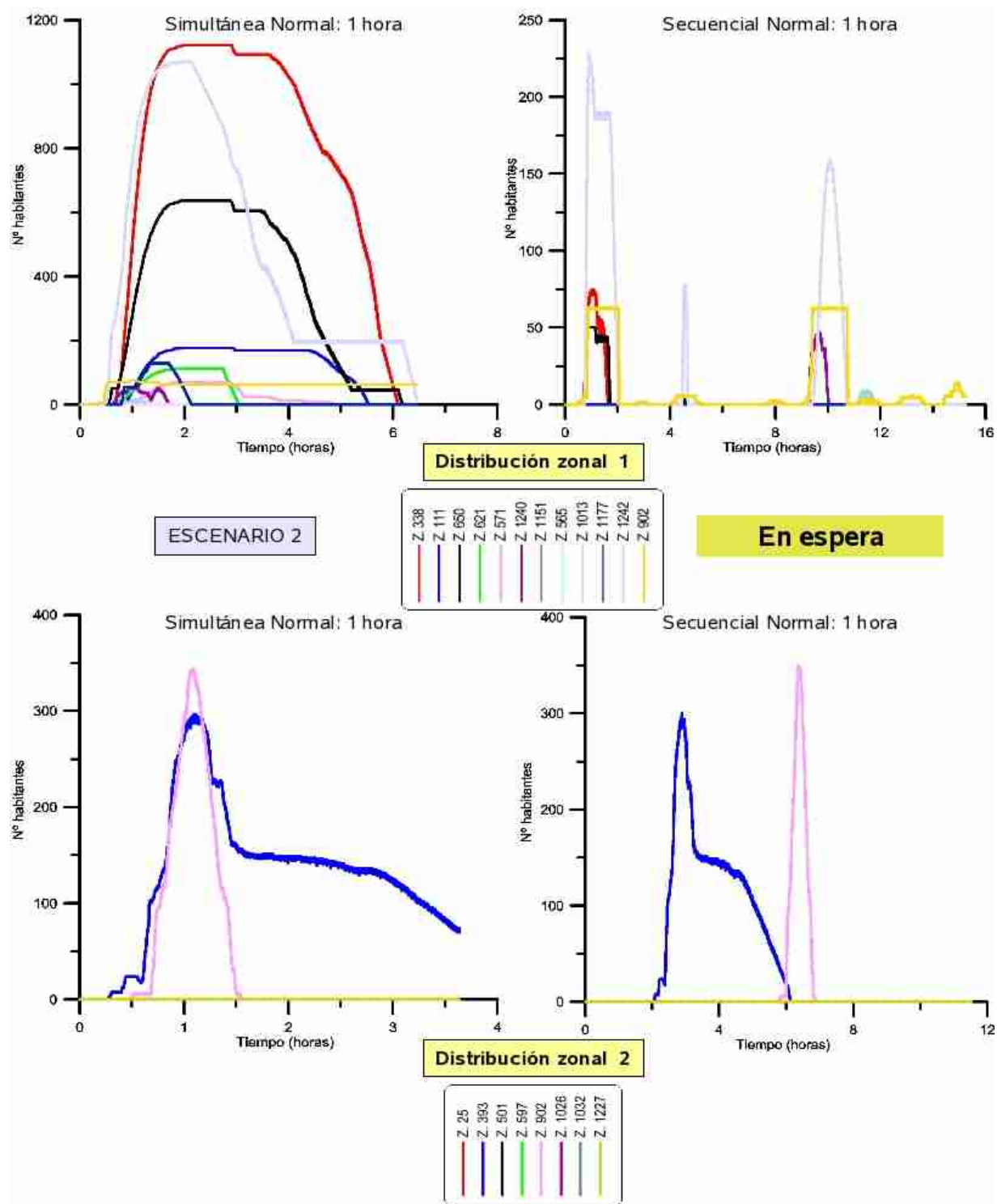


Figura 84: Número de personas en espera para el escenario 2.

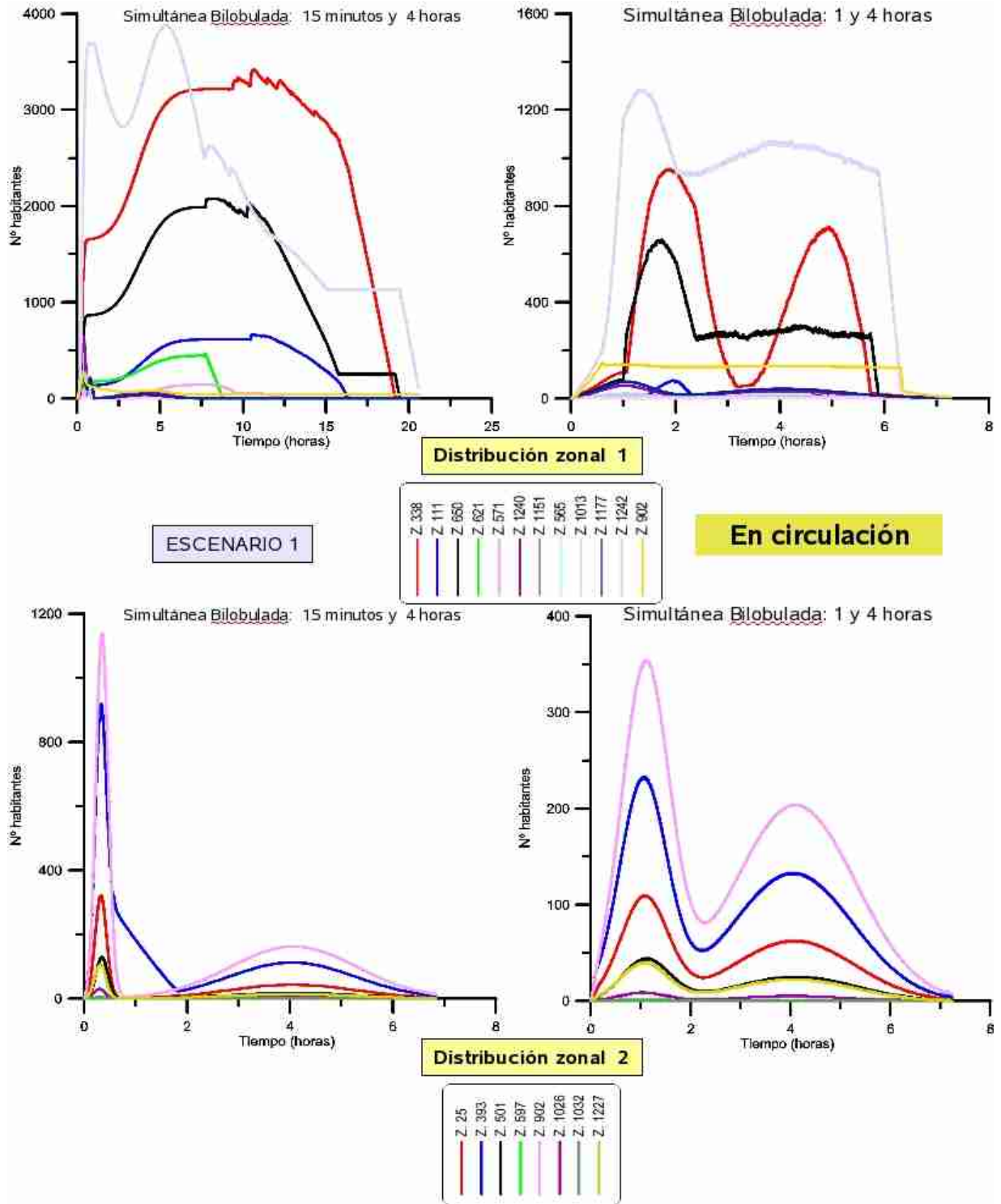


Figura 85: Número de personas en circulación para el escenario 1.

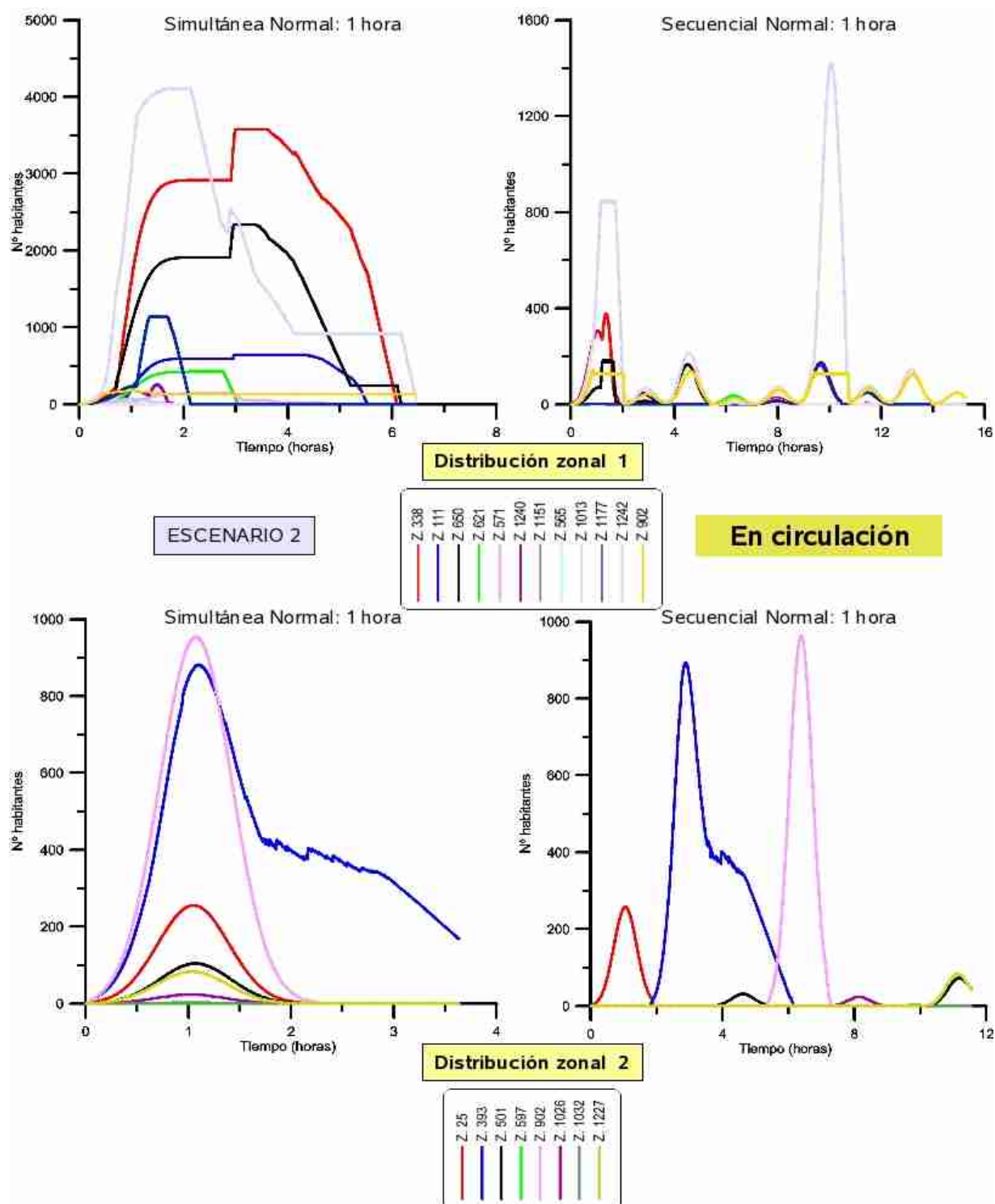


Figura 86: Número de personas en circulación para el escenario 2.

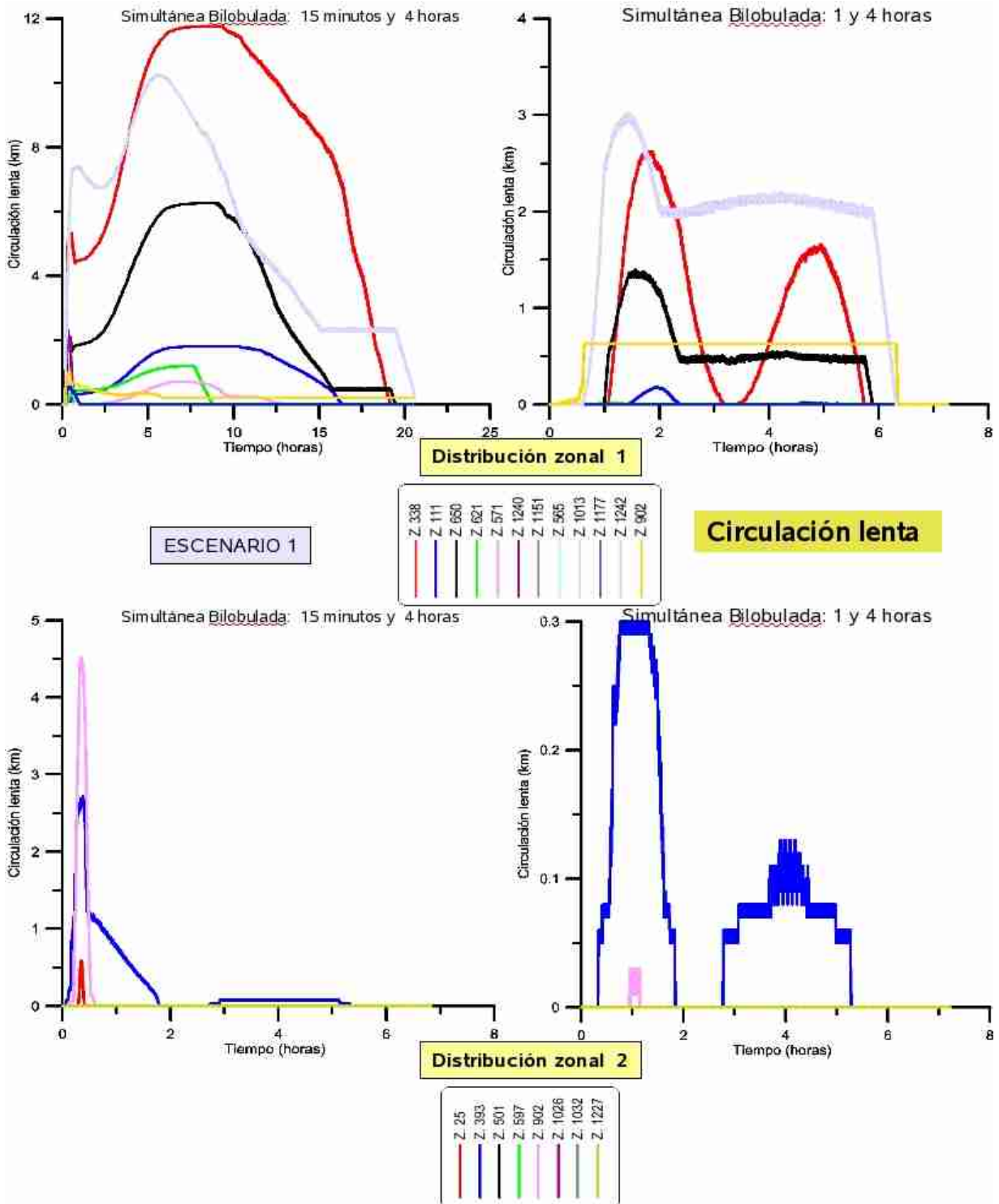


Figura 87: Kilómetros de vía con circulación lenta para el escenario 1.

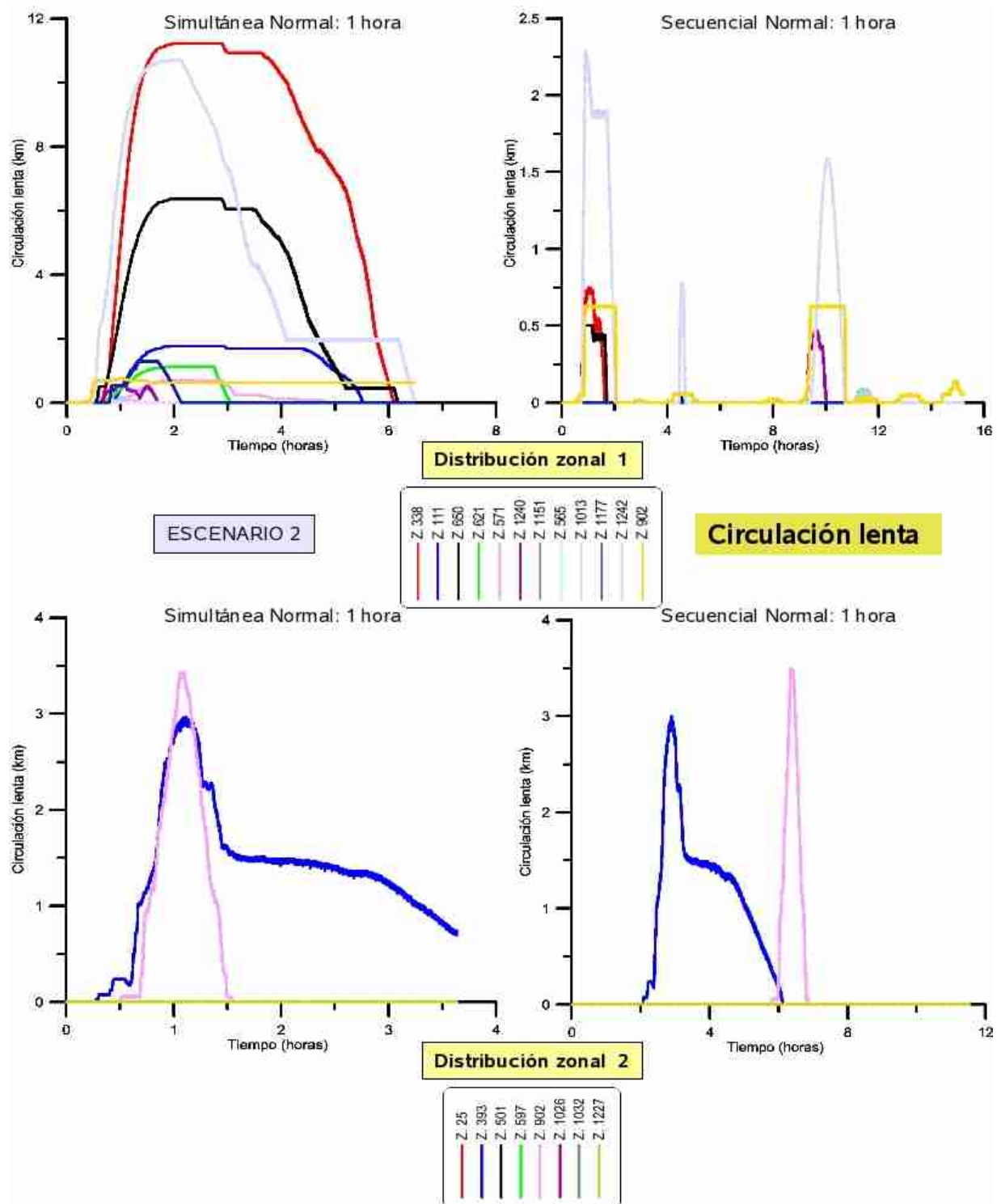


Figura 88: Kilómetros de vía con circulación lenta para el escenario 2.

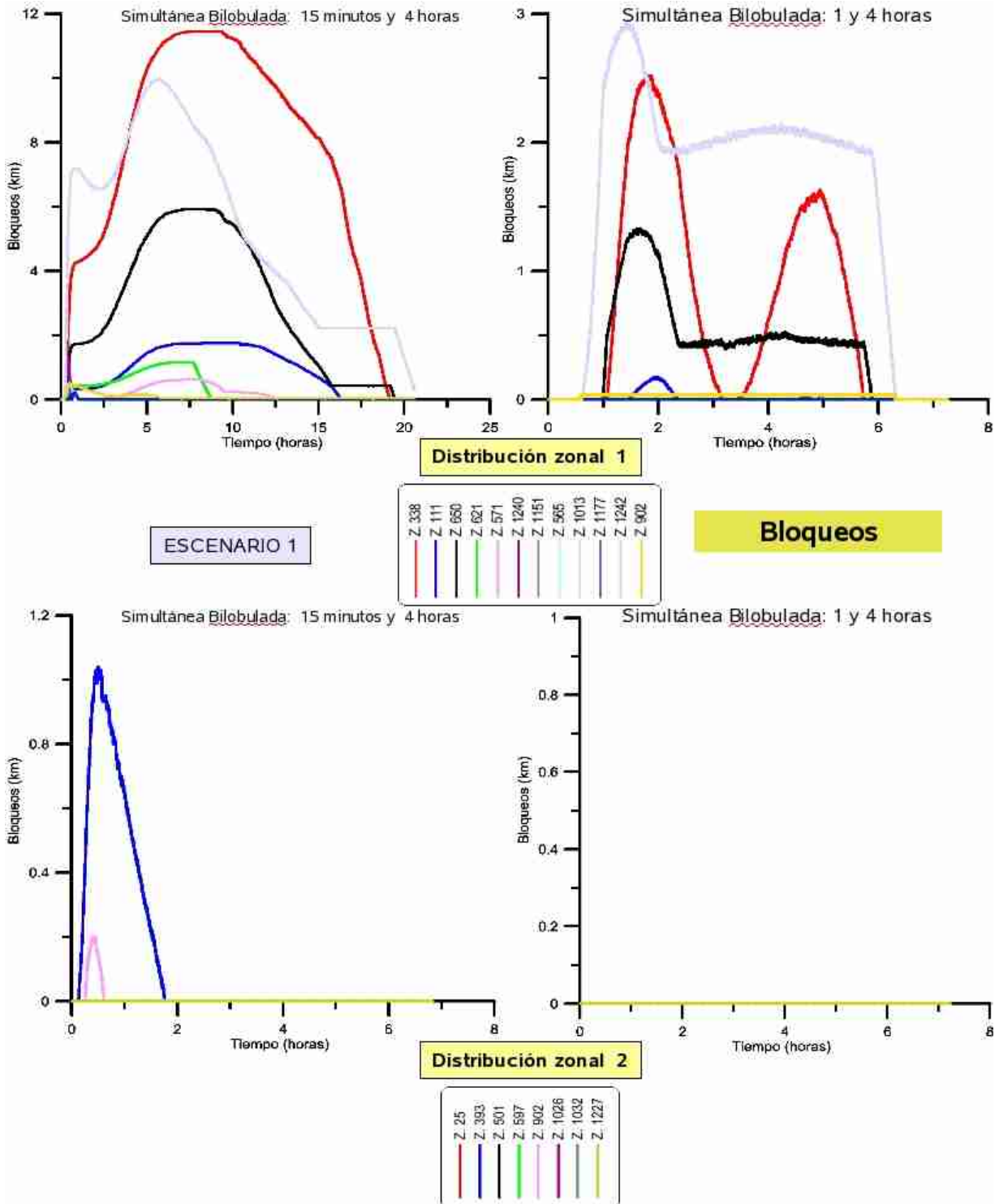


Figura 89: Kilómetros de vía bloqueada para el escenario 1.

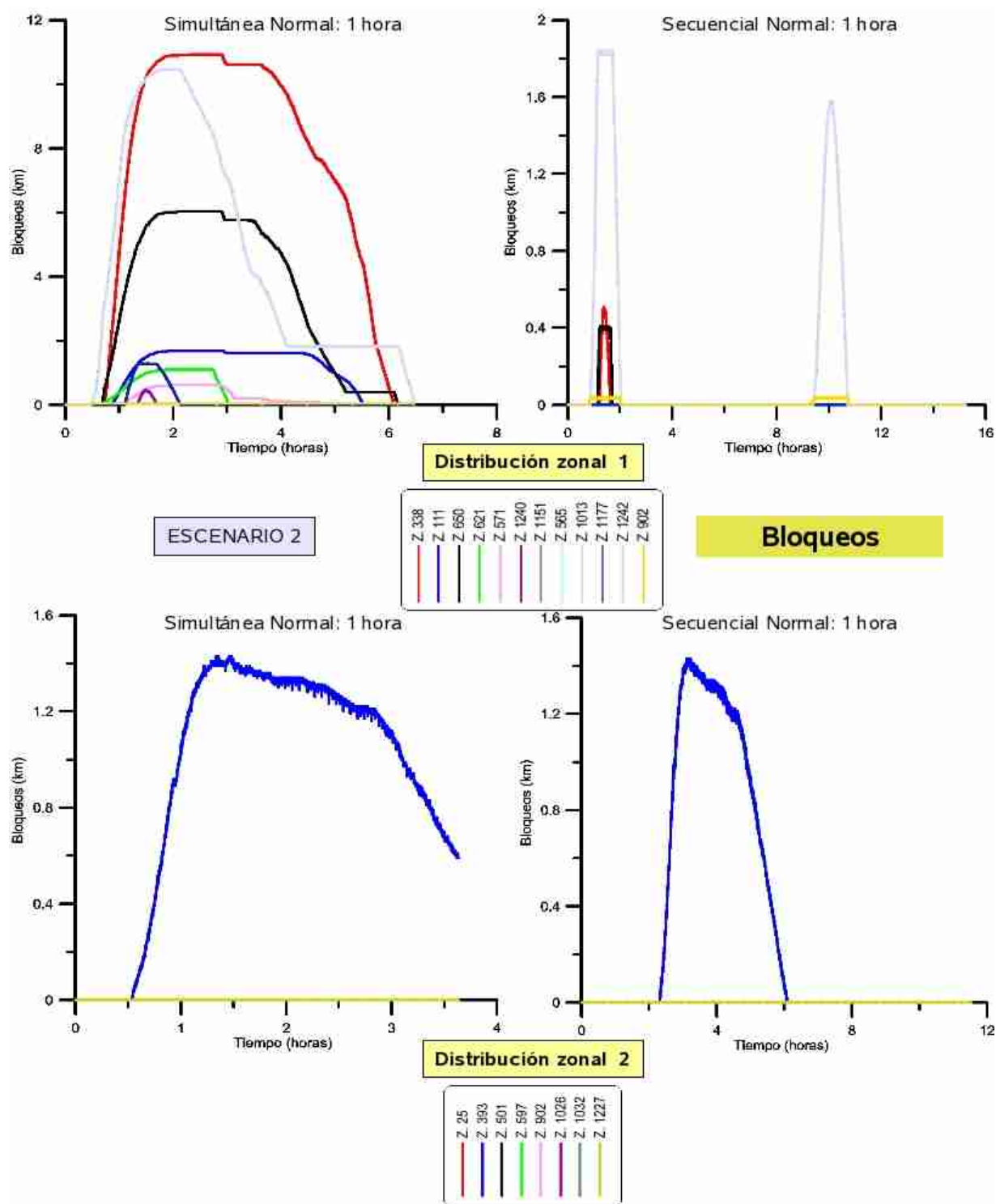


Figura 90: Kilómetros de vía bloqueada para el escenario 2.

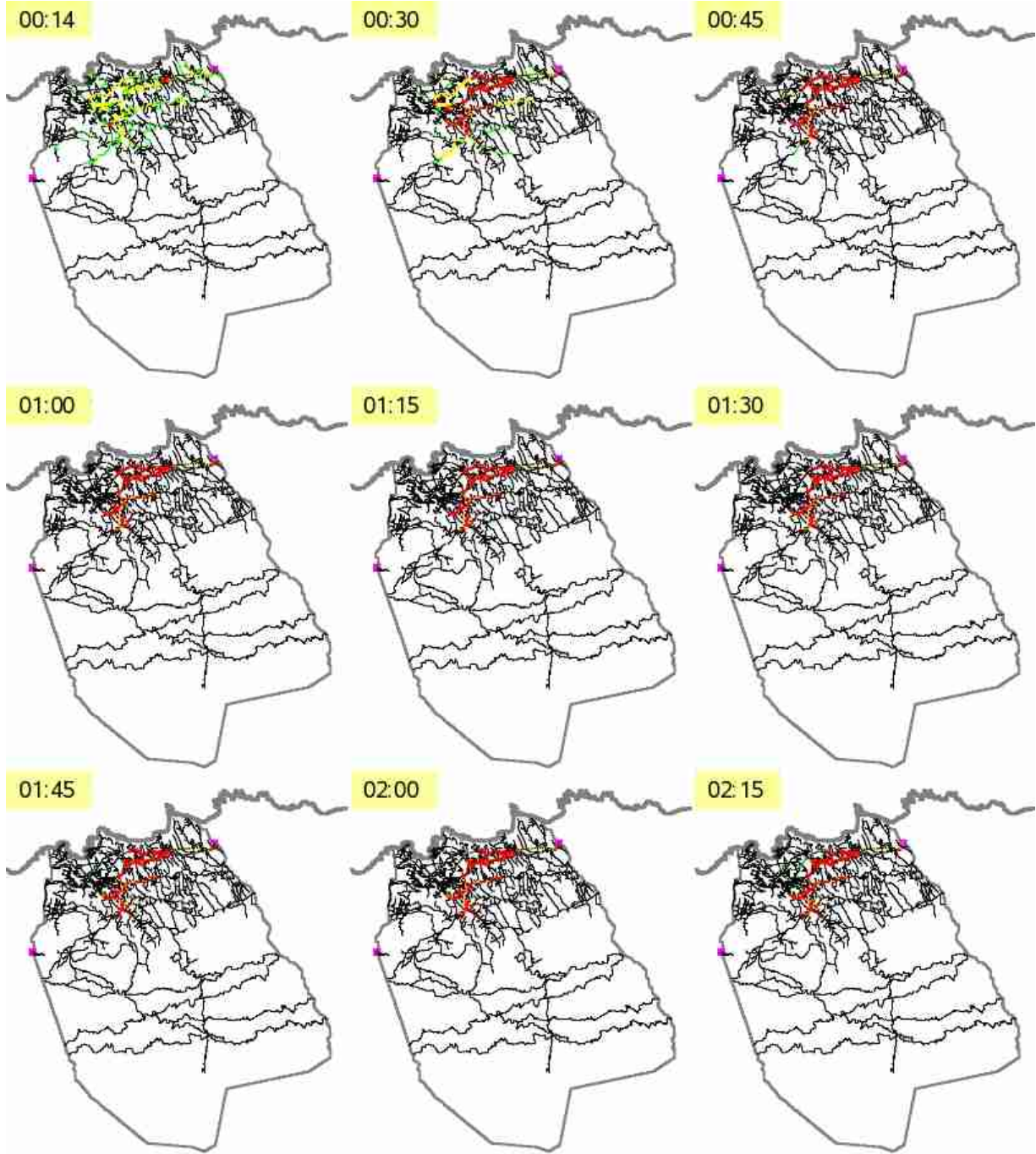


Figura 91: Escenario 1, distribución zonal 1, simulación con función de comportamiento de la población normal bilobulada de 15 minutos y 4 horas. Evolución de los bloqueos durante las dos primeras horas. Los bloqueos se sitúan en las principales vías de comunicación del municipio a medida que se sobrecargan.

3.9 Resultados obtenidos

3.9.1 Tiempo de movilización

En las simulaciones realizadas para el municipio de Icod de los Vinos, Tenerife, se ha tenido en cuenta evacuaciones con organización oficial y sin ningún tipo de organización, utilizando en todos los casos la población sus propios medios de locomoción. Estos escenarios se representan modificando los parámetros de la función del comportamiento de la población. La escala de detalle utilizada permite definir el lugar de residencia como punto de partida de la evacuación.

Si observamos las gráficas obtenidas, el escenario que presenta un *tiempo de movilización* mayor es la simulación realizada con la *distribución zonal 1*, con función de comportamiento de la población bilobulada de 15 minutos y 4 horas (ver figura 65). Se observa que en un corto espacio de tiempo hay un contingente importante de población preparada para evacuar. El número de personas en espera se incrementa rápidamente, al mismo tiempo que se producen las retenciones (circulación lenta y bloqueos), y no desciende hasta la fase final del proceso de evacuación.

Tabla 7: Evolución de la primera hora en la simulación realizada con la distribución zonal 1 y bilobulada de 15 minutos y 4 horas. Dado que el simulador calcula fracciones de persona, hay ligeros desajustes debido al redondeo.

Tiempo (horas)	Personas en casa	Personas Preparadas	En Espera (nº hab.)	Circulando (nº hab.)	Circulación lenta (km)	Bloqueos (km)	Llegadas (nº hab.)
0.00	19823	0	0	0	0.00	0.00	0
0.05	19594	229	0	223	0.00	0.00	0
0.10	18795	1028	78	997	0.78	0.00	0
0.15	0	3114	1025	2956	10.25	0.76	145
0.30	0	7767	1778	7029	0.00	13.18	651
0.45	11888	7935	1540	6892	0.00	0.00	0
1.00	11847	7976	1510	6688	0.00	0.00	0

También se produce un incremento en el *tiempo de movilización* en la *distribución zonal 1*, en el escenario 2 (ver figura 71), aunque inferior al ejemplo anterior. Todas las simulaciones realizadas para la *distribución zonal 2* tienen *tiempos de movilización* casi paralelos a los de preparación.

Con las velocidades y capacidad utilizadas, se observa que el *tiempo de movilización* se incrementa cuando se alcanzan valores en las retenciones superiores a los 20 kilómetros. Esto sólo ocurre en la distribución zonal 1, con bilobulada de 15 minutos y 4 horas y en la monolobulada de 1 hora en simultáneo.

3.9.2 Tiempo de viaje

En condiciones normales de tráfico, los tiempos de recorrido para cruzar en vehículo de este a oeste el municipio de Icod de los Vinos, Tenerife, varían entre 5 y 10 minutos aproximadamente, en función de las características de la vía de comunicación utilizada. Igualmente, los desplazamientos en sentido norte-sur no exceden los 15 minutos. Por tanto, las distancias a recorrer son cortas y el tiempo de viaje se ve condicionado principalmente por la forma en la que se organiza y evoluciona la circulación.

Tabla 8: Tiempo de viaje inicial en horas de la distribución zonal 1 calculado a partir del punto más alejado de cada zona respecto a la salida del área de evacuación asignada.

Zona	TVL	Zona	TVL	Zona	TVL
338	0.16	571	0.11	1013	0.01
111	0.15	1240	0.11	1177	0.06
650	0.13	1151	0.09	1242	0.08
621	0.11	565	0.12	902	0.04

Tabla 9: Tiempo de viaje inicial en horas de la distribución zonal 2 calculado a partir del punto más alejado de cada zona respecto a la salida del área de evacuación asignada.

Zona	TVL	Zona	T. inicial	Zona	T. inicial
25	0.05	597	0.01	1032	0.04
339	0.11	902	0.15	1227	0.11
501	0.03	1026	0.05		

3.9.3 Tiempo de evacuación

Para las simulaciones realizadas los tiempos de evacuación obtenidos son los siguientes:

- Distribución zonal 1.
 - Escenario 1.
 - Bilobulada 15 minutos y 4 horas, 20.58 horas.
 - Bilobulada 1 y 4 horas, 7.26 horas.
 - Escenario 2.
 - Monolobulada 1 hora simultánea, 6.46 horas.
 - Monolobulada 1 hora secuencial, 15.23 hora.
- Distribución zonal 2.
 - Escenario 1.
 - Bilobulada 15 minutos y 4 horas, 6.83 horas.
 - Bilobulada 1 y 4 horas, 7.23 horas.

- Escenario 2.
 - Monolobulada 1 hora simultánea, 3.63 horas.
 - Monolobulada 1 hora secuencial, 11.53 horas.



Figura 92: Calle del núcleo de población principal del municipio de Icod de los Vinos. Tenerife, España. (Foto: J.M. Marrero)

Los tiempos obtenidos muestran que la distribución zonal 1 posee un tiempo mínimo de 6 horas y un máximo de 20 horas. Esta simulación resulta menos óptima para la evacuación debido a la concentración de tráfico que se produce en determinadas vías de comunicación. Por el contrario, la distribución zonal 2 posee tiempos de evacuación menores que los obtenidos en el primer caso.

Se ha observado que las salidas en simultáneo reducen el tiempo global de la evacuación, aunque el nivel de retenciones obtenidos es mayor que en la evacuaciones secuenciales. Estas últimas, requieren más tiempo y mejor preparación, pero favorecen la fluidez del tráfico al reducir las retenciones. El problema que acarrearán las retenciones, cuando el nivel de estrés de la población es importante a consecuencia de la emergencia, es que crean una mayor incertidumbre: pueden producirse averías de vehículos, pequeños accidentes, peleas entre conductores y, especialmente, abandono de vehículos. Todo ello podría incrementar el tiempo

de evacuación notablemente, por lo que hay que tener presente que lo que en primera instancia puede parecer la mejor solución, podría convertirse en todo lo contrario en una situación real. Una de las limitaciones del programa es que la simulación siempre se presenta como un proceso homogéneo y continuo en el tiempo. Aunque permite introducir cualquier evento externo, por ejemplo un accidente o una decisión de los responsables de la circulación, éstas no son conocidas a priori y por ello no se incluyen, salvo para demostración.

Para evacuaciones secuenciales, hay que llegar a un compromiso entre el número de zonas en las que distribuye la población y el contingente que hay en cada una de ellas. Cuanto más se subdivida el área, aunque el número de personas contenida en ella sea menor, la repetición del proceso para cada una de las zonas incrementará el tiempo notablemente.

3.9.4 Circulación

El análisis por zonas realizado en la *distribución zonal 1* muestra que las retenciones se producen en las vías de circulación que concentran el tráfico de la población situada en la zona superior del municipio (nº 338 y 650) y en la zona inferior (nº 1242), cuya vía que dirige el flujo hacia la carretera comarcal principal del municipio, la TF-5. También coincide con las zonas que concentran mayor población. Los bloqueos pueden verse perfectamente en la secuencia fotográfica mostrada en la figura 64.

El núcleo urbano principal del municipio se localiza en la zona 1240, la que posee un mayor número de habitantes, sin embargo la dirección de salida para conectar con la carretera TF-5 se efectúa hacia el oeste. Esta circunstancia reduce las retenciones, únicamente detectadas en los primeros 15 minutos de la primera simulación realizada.

En la distribución zonal 2, la circulación de cada zona actúa de forma independiente al disponer de puntos de salida propios. Por ello, las retenciones son mínimas, sólo se producen con un impacto mínimo en la zona del casco 393, que coincide con el núcleo urbano principal, y en la zona 902 que recoge parte de la población situada en la zona superior y atraviesa las vías conflictivas señaladas en la distribución zonal 1.

En las evacuaciones con una función de incorporación bilobulada, donde se simula dos grupos de personas, uno preparado con una incorporación rápida, y otro menos preparado con incorporación más lenta, los atascos principales se producen en la fase inicial, consecuencia de la rápida incorporación del primer grupo.

CAPITULO 4

Aplicación al volcán Chichón



Conmemoración erupción 1982, Foto A. Linares, 2007

4 Aplicación al volcán Chichón

4.1.1 Introducción

El volcán Chichón, situado en el estado de Chiapas (México), es conocido por la trágica erupción ocurrida en 1982 que ocasionó varios miles de muertos y desaparecidos. Desde 2007 la Protección Civil Mexicana, en estrecha colaboración con diversos equipos científicos, está desarrollando un nuevo Plan de Emergencia para la zona. En el marco de cooperación científica en el ámbito del riesgo volcánico entre el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC, España), la Universidad Nacional de México (UNAM), el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED, México) y la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas (UNICACH), ha diseñado un ejercicio para evaluar los distintos aspectos de la gestión de una crisis volcánica, especialmente los referentes a la toma de decisiones y ejecución de la evacuación de la zona. En este ejercicio se utilizan las herramientas informáticas disponibles hoy en día, orientadas a la gestión y mitigación del riesgo volcánico. En particular, se nos solicitó la aplicación de diversas simulaciones para la optimización del Plan Operativo de las zonas sujetas a impacto, para los distintos escenarios eruptivos propuestos por el Comité Científico, en base a la información disponible del volcán y condiciones meteorológicas previstas para el momento de la erupción.



Figura 93: Vista aérea del cráter del volcán Chichón, México, en la que se puede observar el lago cratérico y emisión fumaroliana (foto R.Ortiz, 2002)

4.2 Características

El Volcán Chichón, ($17^{\circ}21'38''$ N y $93^{\circ}13'28''$ W), está situado en la Región Norte del estado de Chiapas (México), entre los municipios de Chapultenango, Ostuacán, Pichucalco y Francisco de León que, conjuntamente, tienen una población aproximada de 60000 personas. Está ubicado en el Arco Volcánico Chiapaneco, con una edad entre el Plioceno hasta Reciente, y se emplaza en un basamento constituido por diversas capas sedimentarias (evaporitas, calizas, areniscas y lutitas) que van desde el Jurásico-Cretácico hasta el Terciario, afectado localmente por fallas con dirección E-W (falla de San Juan) y normales de rumbo N 45° E (fallas de Chapultenango), (Macías, 2005).



Figura 94: Situación del Estado de Chiapas, México y localización del volcán Chichón.

El volcán Chichón, con una altitud de 1150 m está formado por un cráter elíptico de 1.5 por 2 km llamado Somma que, en realidad, es un anillo de domos traquiandesíticos con una edad de 0.2 Ma (Duffield et al., 1984, en Macías et al., 2007). Dentro de esta estructura se encuentra el cráter originado en la erupción de 1982, con 1 km de diámetro y paredes verticales del orden de 140 m que actualmente contiene un lago de nivel variable (de 1.5 a 4 metros de profundidad), con un Ph ácido (2-2.5) con una temperatura media de 30°C y salinidad (TDS 4000 mg/l) (Macías et al., 2007). Los análisis geoquímicos realizados en los últimos 20

muestran una reducción de la influencia magmática, un incremento de la influencia hidrometeorológica y una estabilización del sistema geotérmico (Armienta et al., 2002).

4.3 La erupción del 1982.

El volcán Chichón era desconocido como tal hasta 1930 en que, las autoridades locales, comunicaron que en el cerro denominado Chichonal se movía la tierra y se oían sonidos y tras algunos estudios, en 1933 el Instituto Geológico determinó que se trataba de un volcán activo, con un domo central, un pequeño lago y fumarolas. En 1958 aparece en el Catálogo de los Volcanes Activos del Mundo (Simkin and Siebert, 1994). En la década de los setenta, con motivo de la crisis energética, la Comisión Federal de Electricidad (CFE), inició estudios de prospección geotérmica en la zona, considerando también que el volcán era activo. Finalmente, en 1981 en un informe interno de la CFE, se pronostica que el Chichón podría entrar en erupción en los próximos años debido al elevado nivel de actividad sentido, sin embargo, este comunicado no llegó a tenerse en cuenta y no se tomaron las medidas adecuadas (De la Cruz-Reyna y Del Pozzo, 2009).



Figura 95: La columna inicial de la erupción del volcán Chichón, obligó al cierre de dos aeropuertos, situados a 70 km del volcán en Tuxtla Guitierrez, Estado de Chiapas, y Villahermosa, Estado de Tabasco, y al corte de numerosas carreteras, imposibilitando el acceso a la zona (De la Cruz-Reyna y Del Pozzo, 2009) (Foto S. De la Cruz-Reyna, 1982)

En 1982 el Chichón entra en erupción tomando por sorpresa a la comunidad científica del país, no así a la población próxima al volcán que llevaba meses sintiendo temblores, ruidos y explosiones y comunicándolo reiteradamente a las autoridades locales (Macías, 2005).

La instrumentación existente estaba localizada en la presa hidroeléctrica de Chicoasén, perteneciente a la Comisión Federal de Electricidad (CFE) que, a pesar de registrar toda la actividad sísmica desde 1980, los datos no fueron tenidos en cuenta e, incluso, se llegó a pensar que la instrumentación era deficiente o estaba mal instalada (Macías, 2005). La noche del 28 de marzo de 1982 comenzó la primera fase de la erupción con la destrucción parcial del domo central y emisión de una columna pliniana de 27 km de altura. Esta primera fase generó gran desconcierto entre los habitantes de la zona que procedieron a autoevacuar hacia poblaciones más alejadas. La intervención del ejército y la activación del Plan de Emergencia se produjo al día siguiente, acordonando la zona y evacuando a la población que quedaba. Este retraso se debió a las características del Plan Operativo de Emergencia que tenía el estamento militar en aquel momento, basado principalmente en el transporte aéreo de tropas, traslado que fue imposible realizar debido a la ceniza emitida por el volcán (De la Cruz-Reyna y Del Pozzo, 2009).

Durante una semana el volcán permaneció en relativa calma, a pesar de la actividad sísmica constante y diversas explosiones. Este aparente fin de la actividad hizo que las autoridades permitieran el retorno de la población a sus hogares, manteniendo el operativo militar y científico. Esta decisión no fue compartida por diversos equipos científicos desplazados a la zona, pero las dificultades en las comunicaciones y su dispersión impidió una puesta en común de la información (De la Cruz-Reyna y Del Pozzo, 2009). La noche del 3 de abril ocurrió la explosión más violenta, de tipo freatomagmático, destruyendo totalmente el domo central, con oleadas piroclásticas que arrasaron nueve poblaciones en un radio de 8 km, causando la muerte a más de 2000 personas (Macías, 2005). La actividad volcánica continuó con emisión de flujos piroclásticos y columnas plinianas que llegaron a alcanzar los 32 km (Macías et al., 1997). Después del 4 de abril la actividad disminuyó rápidamente, cesando en septiembre de 1982. En localidades alejadas como Ostuacán y Pichucalco la acumulación de ceniza causó el derrumbe del techo de las iglesias.

El material emitido, 0.5 km^3 , modificó totalmente la topografía, generó un cráter de un 1 km de diámetro y afectó a la red hidrográfica de la zona; bloqueó varios cauces de ríos, formando una represa de varias decenas de metros de espesor que dio lugar a un lago con la temperatura del agua próxima a ebullición (Macías et al., 1997). La elevación del nivel del agua en los meses de lluvia provocó la ruptura de la presa, originando lahares calientes que llegaron a 17 km de distancia causando gran destrucción; afortunadamente, el ejército había evacuado las poblaciones situadas aguas abajo (Macías et al., 2004, 2005).

Además de los daños causados en las poblaciones e infraestructuras, el volcán emitió 7 millones de toneladas de SO_2 a la atmósfera, provocando un descenso en la temperatura del planeta de $0.5 \text{ }^\circ\text{C}$, la nube de cenizas de la erupción de 1982 pudo seguirse hasta 1985 (Prohom, 2003, Macías, 2005).

4.4 Aplicación del Cuestionario del USGS.

Nivel de amenaza que presenta un volcán según la metodología propuesta por el United States Geological Survey (USGS) (Ewert et al., 2005). Relaciona diversos factores de peligrosidad con otros de exposición.

Factores de peligrosidad volcánica	
Tipo de volcán	1
Índice de Explosividad Volcánica Máxima	2
¿Ha tenido actividad explosiva en los últimos 500 años?	1
¿Cual ha sido la actividad explosiva máxima en los últimos 5000 años?	1
Periodo de retorno o recurrencia.	3
¿Ha tenido flujos piroclásticos en el Holoceno?	1
¿Ha tenido lahares en el Holoceno?	1
¿Ha tenido coladas de lava en el Holoceno?	0
¿Tiene potencial para producir explosiones hidrotermales?	1
¿Ha producido Tsunamis en el Holoceno?	0
¿Tiene potencial para generar colapsos sectoriales?	0
¿Puede generar lahares primarios?	1
Actividad sísmica observada.	1
Deformación del suelo observada.	0
Actividad fumarólica o desgasificación magmática observada.	1
Suma total de factores de peligro	14
Elementos expuestos	
Log ₁₀ de la población residente a menos de 30 km del volcán.	5
Log ₁₀ de la población residente aguas abajo o aguas arriba del volcán.	3
¿Ha causado muertos en periodo histórico?	1
¿Han habido evacuaciones en periodo histórico?	1
Aviación local expuesta	1
Aviación regional expuesta	3
Infraestructuras de energía expuestas	1
Infraestructuras de transporte	1
Áreas muy desarrolladas o sensibles expuestas	1
El volcán ocupa un área importante de una isla poblada	0
Suma total de los factores de exposición	17
Total de factores de peligro x Total de factores de Exposición = Threat Ranking	238
Nivel amenaza: Muy Ata: 324-124 // Alta: 123-64 // Moderada: 63-30 // Baja: 30-6 // Muy baja: 6-0	

El resultando obtenido cataloga al volcán Chichón con un nivel de amenaza muy alto. Dado que se encuentra dentro del mismo grupo que el volcán Teide, España, las recomendaciones propuestas en Ewert et al. (2005) son válidas para ambos. Actualmente, el monitoreo del volcán lo realiza el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), con la cooperación del Instituto de Ciencias de la Tierra, de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas (UNICACH) y el Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).



Figura 96: Muestreo de aguas por miembros del Instituto de Geofísica de la UNAM y Departamento de Ciencias de la Tierra de la UNICACH (Foto R. Ortiz, 2002).

4.5 Estado actual y distribución de la población

Para la caracterización del poblamiento localizado en el entorno del volcán Chichón se ha utilizado el informe elaborado por la Comisión Nacional de Población (CONAPO, 2006), basado en el II Censo de Población y Vivienda 2005 y la Encuesta Nacional de Ocupación y Empleo (ENOE) 2005, IV Trimestre, elaborados por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) de México. El informe elabora un índice para evaluar el grado de marginación de la población a partir de 9 variables: las dos primeras se centran en el nivel educativo de los mayores de quince años, distinguiendo entre los analfabetos y los que no han superado la escuela primaria; los cinco índices siguientes se centran en el estado de las viviendas ocupadas, valorando porcentualmente el número de viviendas sin drenaje, sanitarios, energía eléctrica, agua potable, hacinamiento y si tienen suelo de tierra o no; el octavo parámetro estima el porcentaje de poblaciones inferiores a 5000 habitantes y el noveno el porcentaje de personas que reciben un sueldo equivalente a dos salarios mínimos.

Chiapas posee uno de los mayores índices de marginalidad de todo el país de México, con una población de 4293459 de habitantes, el 21.35 % de la población mayor de 15 años es analfabeta y el 42.76% no ha superado la Enseñanza Primaria. Desde el punto de vista de las infraestructuras, destaca que el 25.90% de las viviendas carecen de agua potable. En Chiapas, los grupos étnicos indígenas representan un importante contingente, 957255 lo que equivale a un 26.1% de la población total del estado y de ellos, un 37.4% son de habla monolingüe (lenguas indígenas). A una escala de detalle, los municipios situados en el entorno del volcán Chichón muestran una distribución de pequeñas poblaciones, muchas de ellas con predominio de etnias indígenas que mayoritariamente no saben hablar castellano, bajo nivel cultural y escasos recursos. De hecho, el área está catalogada como una zona con alto índice de

marginalidad, aspecto que desembocó, por diversos motivos de índole socio-económico, en la Rebelión Zapatista de 1994. En general, la zona de estudio carece de multitud de recursos, entre ellos las conducciones sanitarias y de agua potable y electricidad, lo que se traduce indirectamente en una red pobre de comunicaciones; muchos de estos poblados presentan grandes dificultades de acceso y, algunos, ni si quiera poseen caminos de terracería. Tras la erupción de 1982, los poblados que fueron arrasados por los flujos piroclásticos, se reconstruyeron en puntos más alejados del volcán, como por ejemplo Nuevo Francisco León. En otros casos, como el de Viejo Volcán, se proporcionó a sus habitantes una vivienda en Chapultenango, sin embargo, algunas familias no aceptaron esta nueva residencia y reconstruyeron su antigua vivienda en el poblado donde residían, de tal forma que, hoy en día, los habitantes de Viejo Volcán están repartidos en dos localidades.



Figura 97: Fotografía del volcán Chichón, Chiapas (México), en 1981. Obsérvese el impresionante domo que rellena el cráter. (Foto: Rene Canul. Comisión Federal de Electricidad)

En general, desde el punto de vista de Protección Civil, la zona expuesta al impacto directo del volcán resulta sumamente complicada: delicada situación socio-económica, agravada por el problema étnico y de comunicación, cierto resentimiento por el fracaso de la gestión de la erupción de 1982 y graves dificultades de acceso. El desarrollo de Planes de Emergencia y establecimiento de rutas de evacuación lleva aparejado una mejora en las vías de comunicación.

Tabla 10.: Población indígena en el estado de Chiapas

Estado	Población indígena			% Población de >5 años de habla indígena		
	Total	Hombres	Mujeres	Total	Hombres	Mujeres
Chiapas	957 255	475 255	482 000		24.7	26.1
% Población de >5 años de habla indígena monolingüe por grupos de edad				% Población de >5 años de habla indígena monolingüe		
5-14 años	15-29 años	30-64 años	<65 años			
32.8	32.7	30.4	4.1	25.2	18.5	32

Tabla 11: Estimaciones del CONAPO con base en el II Censo de Población y Vivienda 2005 y Encuesta Nacional de Ocupación y Empleo 2005 (IV Trimestre)

Municipio	Población total	% Pobl. analfabeta de 15 años o más	% Pobl. sin primaria completa de 15 años o más	% Ocu. en viviendas sin drenaje ni servicio sanitario	% Ocu. en viviendas sin energía eléctrica	% Ocu. en viviendas sin agua entubada	% Viviendas con algún nivel de hacinamiento	% Ocu. en viviendas con piso de tierra	% Pobl. en localidades con menos de 5,000 habitantes	% Pobl. ocupada con ingreso de hasta 2 salarios mínimos	Índice de marginación	Grado de marginación	Lugar que ocupa en el contexto nacional
<u>Chiapas (estado)</u>	4 293 459	21.35	42.76	8.07	5.88	25.90	60.20	32.99	58.46	78.14	2.32646	Muy alto	2
<u>Ostucacán</u>	16 392	20.01	52.82	15.68	17.92	42.74	64.89	33.53	100.00	87.59	1.13580	Muy alto	339
<u>Ocoatepec</u>	10 543	41.74	71.94	9.34	7.33	14.39	79.62	39.87	100.00	92.90	1.61863	Muy alto	150
<u>E. Leon</u>	6 454	28.14	63.42	12.60	14.58	29.45	79.96	48.40	100.00	94.30	1.59830	Muy alto	158
<u>Tanilapa</u>	3 928	22.03	60.41	3.49	3.85	7.41	64.16	32.26	100.00	90.45	0.74781	Alto	556
<u>Chapultenango</u>	7 124	24.03	53.04	2.58	14.02	11.39	55.70	36.18	100.00	93.44	0.82361	Alto	514
<u>Ixtacomitán</u>	9 696	18.36	42.46	5.30	13.77	26.78	62.07	29.80	100.00	83.49	0.63778	Alto	617
<u>Pichucalco</u>	29 583	19.70	42.41	6.26	7.58	31.17	56.22	22.56	52.62	79.30	0.25708	Alto	950
<u>Sumanga</u>	2 088	23.42	52.52	7.96	15.30	35.84	63.10	36.39	100.00	88.02	1.05427	Alto	370

Tabla 12.: Distribución de la población por proximidad al centro de emisión del volcán Chichón, Chiapas, México. Se refleja el grado de dispersión (localidades menores de 1000 habitantes).

Distancia	Estado	Población Total	Nº Localidades	Pob. Media	Pob. Máxima	Pob. Mínima	Pobl. >1000 hab	Nº Loc >1000 hab	Superficie km2
Global	Todos	2856236	7032	404.75	234174	1	906902	6585	29914.24
10 km	Todos	6785	36	188.47	1104	2	4600	34	0.06
	Chiapas	6785	36	188.47	1104	2	4600	34	0.06
10-30 km	Todos	506157	765	661.64	189981	1	86068	738	2513.14
	Chiapas	506157	765	661.64	189981	1	86068	738	2513.14
30-40 km	Todos	119331	474	251.75	31392	1	50118	459	2199.00
	Chiapas	59638	414	144.05	15443	1	35030	407	1758.33
	Tabasco	59693	60	994.88	31392	1	15088	52	440.66
40-80 km	Todos	1203887	3134	384.14	234174	1	408608	2949	15078.87
	Chiapas	498026	2311	215.5	30407	1	236757	2229	8059.31
	Oxaca	910	4	227.5	526	7	910	4	46.59
	Tabasco	436479	463	685.21	26140	1	158150	537	5245.92
	Veracruz de Ignacio de la Llave	268472	182	1475.12	234174	1	12791	179	1727.04
80-100 km	Todo	1010076	2623	385.08	38865	1	357508	2405	11309.15
	Chiapas	446217	1827	244.23	37627	1	202029	1745	5191.75
	Oxaca	8769	12	730.75	7016	4	1753	11	515.37
	Tabasco	543166	562	966.49	38865	1	143273	428	4114.43
	Veracruz de Ignacio de la Llave	11924	222	53.71	1471	1	10453	221	1487.59

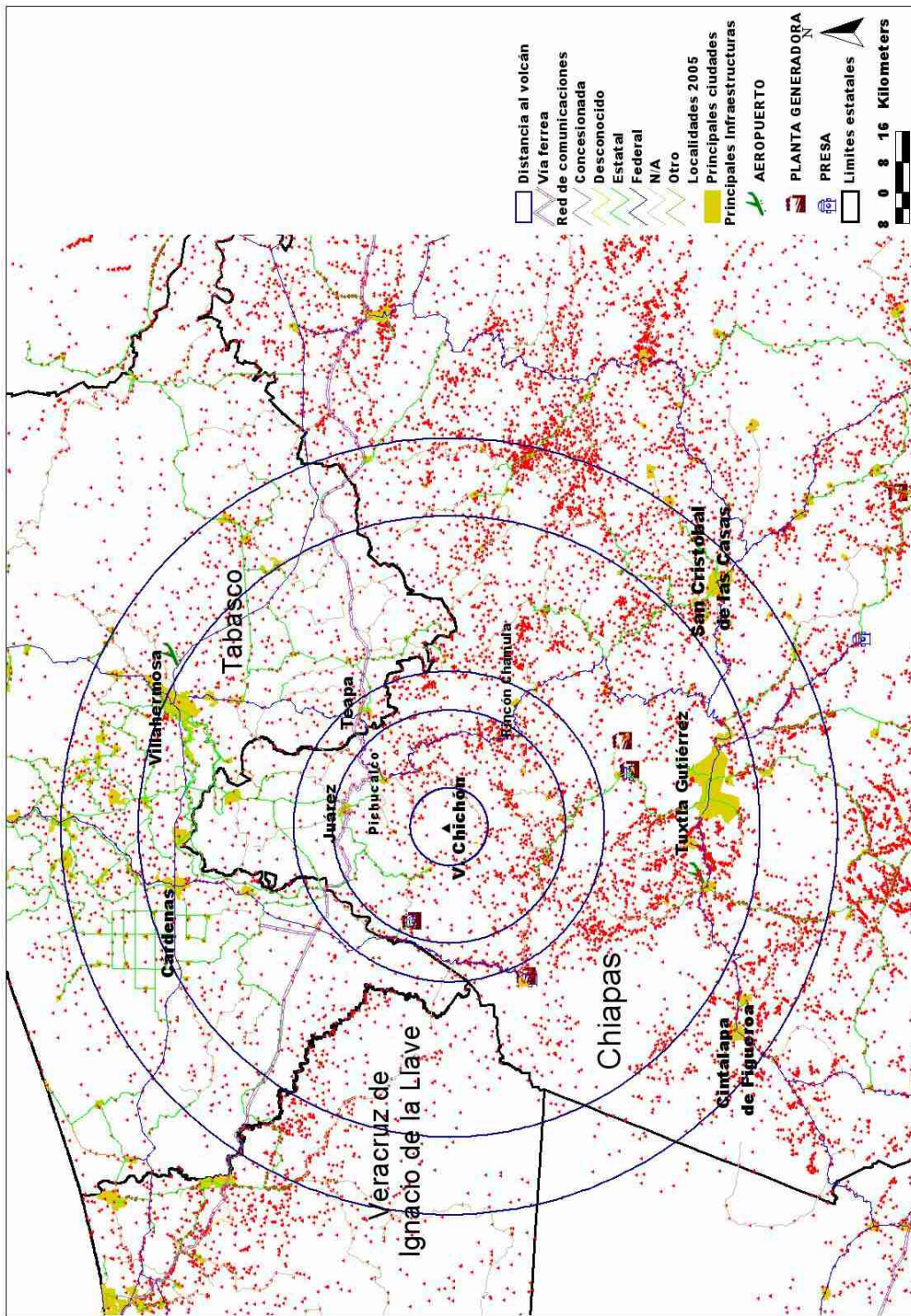


Figura 98: Distribución de la población en el área próxima al volcán Chichón, Chiapas, México. Los anillos corresponden a distancias de: 10, 30, 40, 80 y 100 km

4.6 Plan de Emergencia

La versión actual del Plan Operativo para el volcán Chichón es de octubre de 2007, aunque todavía continúan los trabajos para mejorarlo, se contemplan los siguientes apartados:

1. El volcán Chichón (introducción).
2. Historia eruptiva.
3. Descripción de los tipos de amenazas.
4. Estado actual del monitoreo.
5. Zonas en riesgo.
6. Niveles de alerta.
7. Organización para la instrumentación y operación del plan.
8. Integración de los grupos de trabajo para la operación del plan.
9. Desarrollo del programa preventivo.
10. Desarrollo del programa de auxilio y recuperación.



Figura 99: Restos del poblado El Naranjo destruido por flujos piroclásticos en la erupción de 1982 del volcán Chichón (México). (Foto S. de la Cruz-Reyna)

En la primera parte se describe la historia eruptiva del volcán, sus amenazas y las características del medio físico en que se enmarca. Destacan los efectos de la erupción de

1982, que es la referencia principal sobre la que se desarrolla el Plan Operativo y que ha servido de guía para la definición de las zonas de riesgo.

La metodología para determinar las zonas de riesgo es sencilla y efectiva; primero se definen las amenazas que genera el volcán (flujos piroclásticos, coladas, etc...) y las distancias que pueden alcanzar. Posteriormente, en función de la localización geográfica de las poblaciones o aldeas, se especifican las amenazas a las que están expuestas, obteniéndose un índice de peligrosidad para cada una. En función de este índice, la población deberá ser evacuada o no, en caso de una reactivación del volcán.

La segunda parte se divide en dos bloques, en el primero se desarrolla el Plan Operativo, definiendo la jerarquía de mando, los grupos implicados y las funciones de cada uno, antes, durante y después de la crisis, en base a los niveles de alerta establecidos. En el segundo bloque destaca el programa preventivo, donde se establecen las funciones que deben realizar diversos grupos de actuación, entre ellos el científico, con la elaboración de modelos para generar posibles escenarios que ayuden a mejorar la operatividad del Plan.

Actualmente, gracias al desarrollo de los computadores, de los Sistemas de Información Geográfica y de software específico para la gestión de crisis volcánicas, se dispone de herramientas muy potentes que permiten generar escenarios útiles para optimizar el Plan de Emergencia, adaptándolo a la evolución prevista de la actividad del volcán y a las condiciones meteorológicas. Este avance tecnológico y metodológico debería ser incluido en las fases de pre-alerta (semáforo amarillo), incrementando el número de funciones del grupo científico que actualmente están centradas en el monitoreo y pronóstico del inicio de la erupción, pero no en el tipo y evolución de la misma.

4.7 Ejercicio para la evaluación del Plan de Emergencia

El Comité Científico designado para llevar a cabo el ejercicio para la Evaluación del Plan de Emergencia del volcán Chichón, estaba integrado por S. de la Cruz-Reyna (Instituto de Geofísica de la UNAM), S. Ramos (Instituto de Ciencias de la Tierra de la UNICACH), R. Ortiz y A. García (Departamento de Volcanología, CSIC), A. Llinares (C.E. de Canarias) y J.M. Marrero (Departamento de Edafología y Geología de la ULL). Miembros de este comité, realizaron también labores de evaluación.

4.7.1 Objetivos

Cuando se planteó, conjuntamente con la UNICACH, la elaboración de un ejercicio para el volcán Chichón, uno de los principales objetivos era poder aplicar los diferentes elementos metodológicos que se han elaborado para la gestión de crisis volcánicas, aunque a un nivel limitado dado el número reducido de integrantes que componían el equipo de trabajo. Durante los días previos al momento de la evacuación, fijada para el domingo día 25 de Enero de 2008, se construyó el árbol de eventos, se completó y adaptó la información cartográfica y el modelo digital del terreno, para introducirlos en el Sistema de Información Geográfica, se generaron diversos escenarios de impacto y se delimitó el área potencial afectada en función del VEI esperado, todo ello al mismo tiempo que se emitían los informes sobre la actividad simulada

del volcán y las recomendaciones para Protección Civil. Fue materialmente imposible disponer, en aquel momento, de una cartografía operativa para la aplicación del modelo de evacuaciones; pudo obtenerse semanas después. Esta experiencia, puso de relieve que son necesarias varias semanas de trabajo, aún existiendo datos, para poner operativo un Sistema de Información Geográfica con el que gestionar toda la información necesaria y tenerla disponible para la gestión de la crisis. Hay que tener en cuenta que parte de este trabajo se había empezado a realizar con mucha antelación, pero debido a la lejanía no pudo completarse hasta que se llegó a Chiapas y aún así, fue necesario más tiempo. Se dio prioridad a poner operativo el Sistema de Información Geográfica para la simulación de los escenarios, puesto que el operativo de Protección Civil tenía ya preestablecidas las vías de evacuación y era necesario conocer los resultados de la simulación para la definición de las zonas a evacuar preventivamente.

Otro objetivo importante, especialmente para el desarrollo de este trabajo, era aplicar el modelo en un entorno y a una escala totalmente diferente de la que se ha utilizado en el municipio de Icod de los Vinos, Tenerife. El cambio de escala generó problemas distintos que debieron ser tenidos en cuenta en el modelo y en la metodología (ver apartado 2.5.1 y 2.5.2), pero que eran necesarios para completar el trabajo desarrollado y, sobre todo, para que el producto final realmente pudiera aplicarse en cualquier entorno y escala.

4.7.2 Papel del Comité Científico Asesor

A falta de un equipo técnico, el Comité Científico Asesor asumió ambas funciones:

- Poner en marcha el Sistema de Información Geográfica con los datos disponibles. Este paso era fundamental, no sólo para la aplicación de las simulaciones sino para mostrar los posibles escenarios de impacto sobre los que luego tenía que basarse el operativo.
- Adecuar los datos disponibles en el Sistema de Información Geográfica a las necesidades y formatos de las diferentes herramientas utilizadas, especialmente el modelo de evacuaciones mostrado en este trabajo.
- Elaborar el árbol de eventos del volcán y el diseño de los posibles escenarios.
- Realizar la simulación de caída de cenizas y flujos piroclásticos. Para ello es fundamental el modelo digital del terreno, al igual que los datos de la dirección del viento de los días previstos para la hipotética erupción.
- Asistir, como Comité Científico Asesor, a las reuniones oficiales, tanto las preparatorias como las que se convocaron durante el proceso de activación de emergencia simulado.
- Generar la simulación de la evolución del volcán que debía quedar reflejada en los informes que se emitían a Protección Civil.

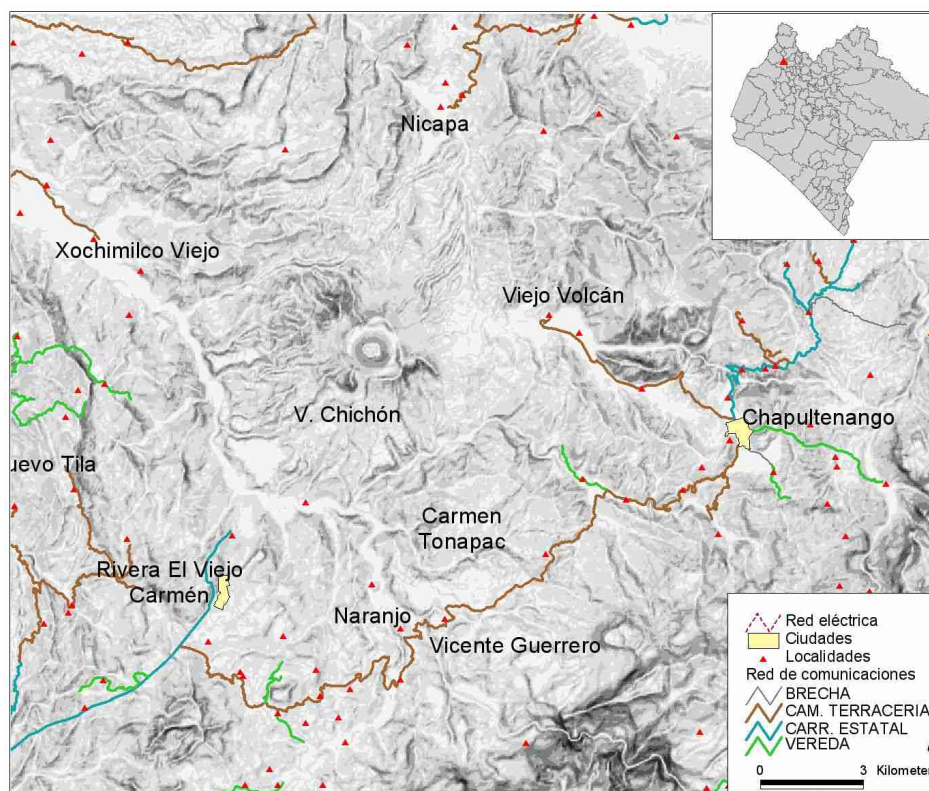


Figura 100: Mapa de situación del entorno del volcán Chichón, Chiapas, México. Durante el ejercicio se evacuó a la población de Viejo Volcán a Chapultenango. A pesar de la poca distancia entre ambas poblaciones, la situación de peligro es muy distinta, pues Chapultenango está protegida del impacto directo por obstáculos orográficos y sólo puede verse afectada por caída de cenizas.

La evolución de la actividad simulada del volcán fue propuesta directamente por el Comité Científico Asesor, utilizando datos reales de la erupción de otro volcán de características similares, aunque los técnicos del CENAPRED estaban en la zona realizando ajustes en la transmisión de los datos reales.

Como objetivo, la Protección Civil del Estado de Chiapas se planteó la participación del mayor número de instituciones posibles en el ejercicio. Para los técnicos encargados de la gestión, la evacuación de un pequeño poblado no les plateaba graves problemas; a lo largo del año se ven obligados a evacuar amplias zonas durante semanas, debido al impacto de diversos fenómenos meteorológicos, especialmente lluvias intensas. Al implicar a las principales instituciones, no solo del propio estado de Chiapas, sino también las federales, querían poner de relieve las dificultades que tiene este tipo de operaciones a todos los niveles. Los diversos estamentos de sanidad, educación, infraestructuras, ejército y policía estuvieron presentes, cada uno en su cometido. Como resultado, una de las conclusiones que se obtuvo fue la sobre-actuación; 188 personas se movilizaron para evacuar a 47. Obviamente, en una situación real no se hubieran utilizado tantos medios para un número tan reducido de evacuados, pero debemos entender este hecho dentro del contexto mencionado



Figura 101: Uno de los carteles utilizados para indicar la ruta de evacuación. Obsérvese que el cartel fue colocado mucho antes de la preparación del ejercicio de evacuación. Estos carteles son renovados periódicamente (Foto J.M. Marrero, 2009)

Debe hacerse especial mención del departamento de Obras Públicas, cuyo papel consistió en detectar las fortalezas y debilidades de la ruta de evacuación utilizada, para proponer cambios en el trazado o realizar diversas obras que aseguraran su integridad. La vulnerabilidad de las vías de comunicación es un tema que se trata en este trabajo ya que se considera de gran importancia para el diseño de cualquier Plan de Evacuación.

4.7.3 Desarrollo

El desarrollo del ejercicio respondió a la siguiente planificación:

- Simulación de signos de reactivación del volcán Chichón. El equipo local de seguimiento de la actividad convoca al Comité Científico para valorar la situación.
- 18/01/2009: Llegada a Tuxtla Gutiérrez, capital del Estado de Chiapas, del Comité Científico Asesor Externo.
- 19/01/2009: Reunión con los expertos locales en el Departamento de Ciencias de la Tierra de la UNICACH para la preparación del ejercicio. Recogida de material y documentación para completar el Sistema de Información Geográfica. Se emite un comunicado a las autoridades de Protección Civil para activar el Plan de Emergencia de acuerdo con el ejercicio planificado.
- 20/01/2009: Reunión en la Sala de Crisis de la Protección Civil del Estado Chiapas en Tuxtla Gutiérrez con la asistencia de todas las instituciones implicadas. Se discute la

conveniencia de realizar la evacuación de la zona de acuerdo con los partes emitidos por el Comité Científico y se realiza la asignación de funciones a todos los cuerpos implicados.

- 21/01/2009: Protección Civil trabaja en la planificación de la evacuación, mientras, el Comité Científico continúa con las labores de pronóstico. Paralelamente se sigue trabajando en la información introducida en el SIG y en la adaptación de formatos para el análisis de las señales sísmicas y modelización de erupciones.
- 22/01/2009: Se emite un comunicado en el que se pronostica la erupción simulada para los próximos días. Aunque en una crisis real, el Comité Científico habría permanecido en la capital para informar directamente a las autoridades, en este caso, y dado que también tenía que actuar como evaluador del ejercicio, se desplazó a la zona próxima al volcán.



Figura 102: La cubierta de la iglesia de Chapultenango, Chiapas, México, tuvo que ser reconstruida tras colapsar por el peso de la ceniza en la erupción de 1982 del volcán Chichón (Foto J.M. Marrero, 2009).

- 23/01/2009: Se elige como centro de acogida de evacuados la escuela de Primaria de Chapultenango. Se visitan las instalaciones y se departe con el personal de la misma para comentar diversos aspectos del riesgo existente en la zona y del ejercicio. También se tratan temas concretos de educación para la mitigación del riesgo volcánico. Posteriormente, en la faceta de evaluadores, se visita la localidad de Viejo

Volcán para conocer la percepción sobre el riesgo volcánico de la población a evacuar y las características de la ruta de salida. Se constituye el Comité de Crisis Local en la Municipalidad de Chapultenango, presidido por el Sr. Alcalde. Protección Civil presenta el ejercicio e informa a la población de las acciones que se van a realizar, insistiendo que todo es una simulación y que nada anormal sucede en el volcán. Hay que recordar que todavía perdura en la memoria de la población el desastre ocurrido en la erupción de 1982. Se emite un nuevo comunicado sobre la situación simulada del volcán cuya erupción se pronostica para el día 27/01/2009, recomendando la evacuación para el día 25/01/2009.

- 24/01/2009: Llegada de los responsable de las instituciones implicadas. Sanidad decide cambiar el centro de acogida de evacuados porque el primer lugar que se designó no reunía las condiciones necesarias. El Comité Científico realiza las simulaciones con los vientos previstos para el día 27/01/2009 y prepara los correspondientes escenarios de impacto. Se monta el Puesto de Mando en la Municipalidad y se cambia el semáforo volcánico a *amarillo*. Se celebra una nueva reunión del Comité de Crisis Local donde se pasa revista a los grupos de intervención y se asignan responsabilidades a las agrupaciones organizadas de voluntarios. El Comité Científico presenta los escenarios de impacto y se discute el alcance de la evacuación. Se emite un nuevo comunicado.
- 25/01/2009: El Comité Científico informa directamente en el Puesto de Mando de la situación del volcán y se emite un nuevo comunicado. La autoridad da la orden de evacuación que empieza a las 11:00 horas. Despliegue del operativo, recogida de los habitantes de Viejo Volcán, transporte y alojamiento en el Centro de Acogida. A todos los evacuados se les realizó un reconocimiento médico en previsión de contagios en el refugio. El Comité Científico emite un último comunicado en el que se indica que el volcán ha vuelto a la normalidad. Comprobada la correcta realización de la evacuación se dio por finalizado el ejercicio y se retornó al lugar de origen a la población evacuada. Regreso del Comité Científico a Tuxtla Guitiérrez.
- 26/01/2009: Reunión de evaluación del ejercicio en la Sala de Crisis de la Protección Civil del estado de Chiapas. Se presenta por parte del Comité Científico, cual habría sido el impacto global de la erupción si se hubiese tratado de un caso real.

En general, las Protecciones Civiles están habituadas a evacuaciones breves, utilizando como centro de acogida las escuelas de zonas seguras. En el caso del riesgo volcánico, este modo de operar se ha demostrado que plantea graves problemas cuando la evacuación se prolonga durante varias semanas, ya que los escolares locales se ven privados de la enseñanza. Otro error muy extendido es utilizar iglesias como refugio en evacuaciones por riesgo sísmico o volcánico, en general, se trata de estructuras muy vulnerables frente a sismos y caída de cenizas.



Figura 103: Escenas del ejercicio de evacuación en el entorno del volcán Chichón, Chiapas, México. De izquierda a derecha y de arriba abajo: planificación del ejercicio en Tuxtla Gutiérrez; informe del Comité Científico en la Municipalidad de Chapultenango; recepción de la información sísmica en tiempo real mediante un teléfono móvil; presentación del escenario de caída de cenizas; Centro de Mando en la Municipalidad de Chapultenango; despliegue de operativo; tres imágenes del momento de la evacuación en Viejo Volcán; Centro de Acogida de evacuados; Preparación del Centro de Acogida; Puesto de control sanitario. (Fotos R. Ortiz y J.M. Marrero, 2009)

4.7.4 Escenarios eruptivos

Los escenarios eruptivos elaborados por el Comité Científico durante el ejercicio, estaban destinados a determinar el área máxima de los impactos probables que quedaría afectada en el caso de producirse una erupción. Estos escenarios se determinaron en función del estado del volcán, establecido a partir de los datos proporcionados por la red de vigilancia del volcán tomado como modelo, similar al Chichón. Se han utilizado las funciones nativas en C del programa VORIS (Felpeto et al., 2007) para las simulaciones de flujos piroclásticos, caída de cenizas y flujos gravitacionales por lahares. Los parámetros utilizados fueron los siguientes:

Tabla 13.: Parámetros de configuración de los modelos utilizados

Flujos piroclásticos. Modelo de Cono de Energía			
Centro emisión	Altura de colapso 1	Altura de colapso 2	Altura de colapso 3
475567.0 1919435.0	300 m	400 m	500 m
Función utilizada para el cálculo del ángulo de colapso: $\alpha = -\log(hc/1300) / 0.116$			
Caída de Ceniza.			
	Velocidad (m/s)	Ángulo (°)	Altura (m)
Viento baja cota	2.0	10.0	0.0
Viento media cota	4.0	30.0	2000.0
Viento alta cota	6.0	40.0	6000.0
Centro de emisión	X = 475567.0 Y = 1919435.0	Difusividad = 6000 m ² /s	
Tamaño ceniza Φ	0.0 (equivale a 1 mm)	Densidad = 1200 kg/m ³	
Desviación ceniza Φ	1.5	Forma de la columna A = 20	
Altura columna	6000 m	Volumen = 0.5 km ³	
Flujos gravitacionales			
Recorrido máximo (celdas)	100000	Nº caminos/centro	10000
Nº centros	20	Altura crítica	10

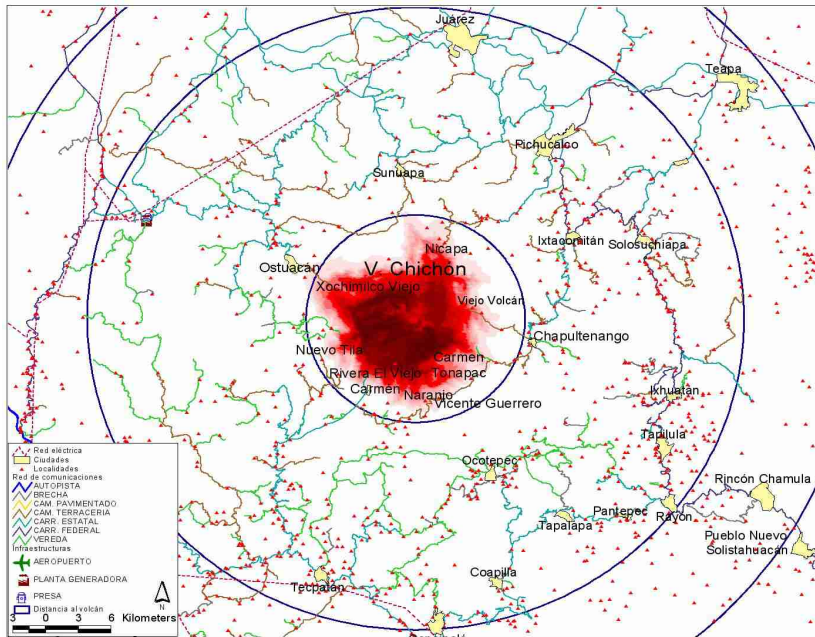


Figura 106: Tercer escenario para flujos piroclásticos, altura de colapso 500 metros. Simulación realizada para el ejercicio del volcán Chichón (México), enero 2009.

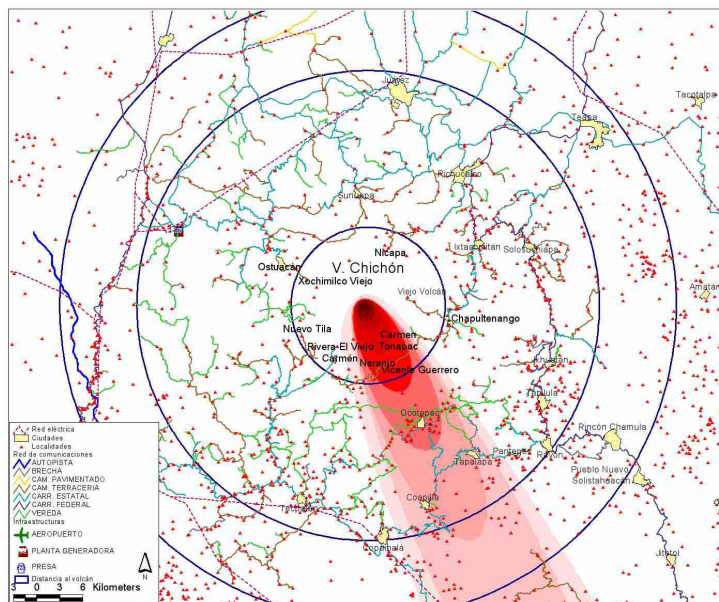


Figura 107: Escenario de caída de cenizas basado en el pronóstico de los vientos predominantes para el día 27/01/2009. Simulación realizada para el ejercicio del volcán Chichón (México)

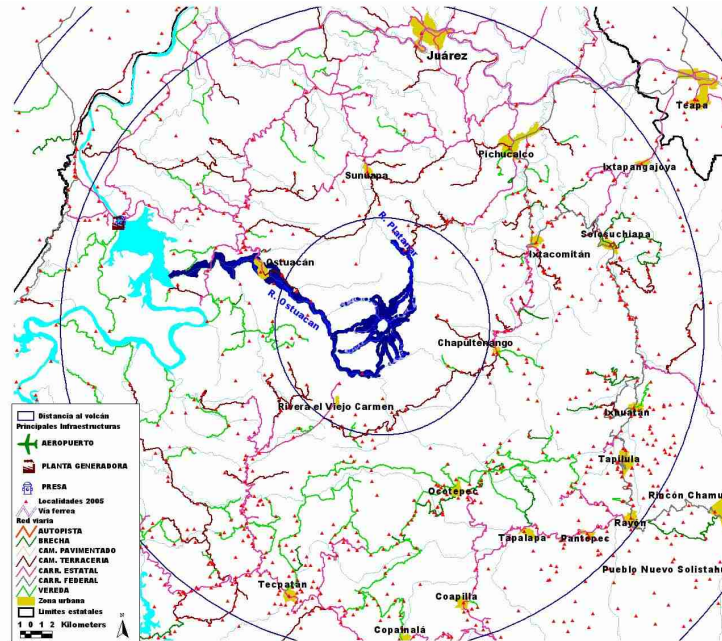


Figura 108: Escenario para flujos gravitacionales. Los materiales emitidos en la erupción de 1982 bloquearon el río Magdalena y formó una represa que al romperse generó un lahar que alcanzó la ciudad de Ostucan (Macías et al., 2004). El modelo simula perfectamente ese trayecto. Simulación realizada en el volcán Chichón (México), en enero 2009.

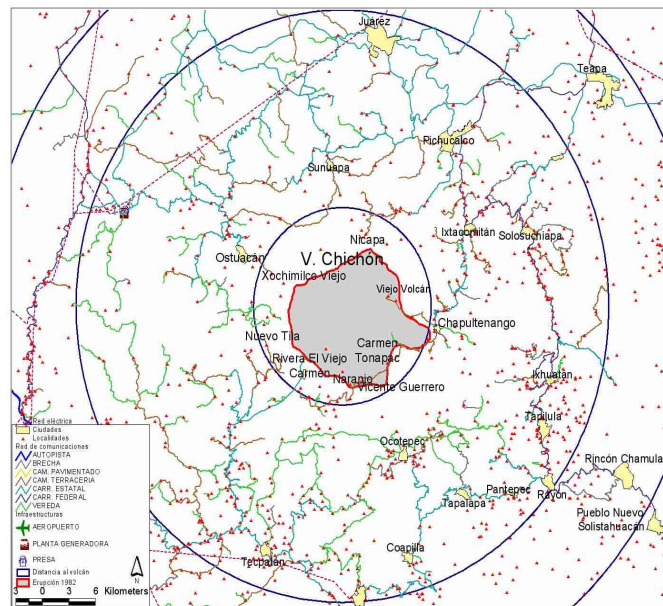


Figura 109: Distribución de flujos y oleadas en la erupción de 1982 (Modificado de Scolamacchia y Macías (2005) en Macías, 2005)

Los resultados obtenidos en las simulaciones para los flujos piroclásticos muestran, a medida que se aumenta la magnitud de la erupción, una tendencia a extender el impacto hacia el norte y oeste, sin embargo, en la delimitación del área afectada en 1982 por flujos y oleadas, realizada por Scolamacchia y Macías (2005) en Macías (2005), muestran un lóbulo en dirección este. Este hecho, podría indicar que los flujos piroclásticos poseían un gran contenido en finos, factor que contribuiría a que fueran más afectados por la dirección dominante de los vientos de baja cota durante la erupción. La modelización de este efecto es muy difícil si no se disponen de datos de micrometeorología de la zona. Para mitigar estos efectos zonales, se realiza una simulación siempre por encima de la esperada, con el objetivo de establecer una zona mayor de seguridad.

Una de las cuestiones que ha puesto de manifiesto el presente ejercicio es que el Plan de Emergencia para el volcán Chichón está muy condicionado por los efectos de la erupción de 1982 y, prácticamente, sólo considera las poblaciones que se vieron afectas por esa erupción. Las posibilidades que ofrece la técnica de simulación actualmente, ayuda a estimar el riesgo al que está sometida la población en el entorno del volcán. Ésto permitirá transformar los Planes de Emergencia estáticos en un elemento dinámico, al integrar en un SIG toda la información disponible y el sistema de simulación.

4.8 Diseño de escenarios de evacuación

En México es habitual llevar a cabo evacuaciones dirigidas y controladas por las autoridades mediante transportes colectivos, especialmente en áreas donde la gente no dispone de vehículo propio, como ocurre en buena parte de los poblados que rodean el volcán Chichón. Además, la erupción de 1982 está aún presente en la memoria de las personas, lo que supuestamente, debería facilitar el proceso de evacuación. Ambos elementos se han utilizado para establecer las bases teóricas de los escenarios simulados, en los que se considera una alerta temprana; el momento para llevar a cabo la evacuación queda fijado con antelación, se trasladan los medios de transporte colectivo para recoger a las personas y llevarlas hasta los lugares seguros designados. El *tiempo de preparación* de la población es corto, dado que tienen un margen de tiempo desde el momento que se da la orden de evacuación hasta la hora en que queda fijada. En la simulación, la capacidad de las vías de comunicación se ha ampliado y se ha reducido la velocidad para recrear el traslado mediante transporte proporcionado por las autoridades que circulan formando un convoy. No se considera crítica la posibilidad de que surjan atascos debido al menor número de vehículos que se ponen en movimiento. Para contrastar los resultados obtenidos, se ha simulado también con capacidades bajas.

Según la información proporcionada por la Protección Civil del Estado de Chiapas, Tuxtla Gutiérrez, capital del Estado, puede acoger al mayor número de evacuados, aunque su capacidad está limitada a quince mil personas. Si el número de evacuados supera ese valor, necesitarían otros núcleos de apoyo, que podrían estar situados dentro del estado de Chiapas o en el de Tabasco, hacia el norte: en la erupción de 1982 se evacuaron 22352 personas (De la Cruz-Reyna y Del Pozzo, 2009). El principal problema para distribuir a la población evacuada en diferentes centros de acogida, se debe a la vulnerabilidad de las vías de comunicación.

Durante la temporada de lluvias y huracanes se producen inundaciones en la zona norte y numerosas vías de comunicación quedan cortadas. Esta situación condiciona el Plan de Emergencia según la época del año en que deba aplicarse.

El primer escenario simulado recrea la situación actual, en la que no existen convenios firmados para desplazar a la población a otros lugares e incluso la meteorología adversa podría dejar fuera de servicio parte de la red de comunicaciones del norte. El segundo escenario pretende simular una evacuación donde el contingente de población se distribuye de forma radial, alejándose hacia los núcleos urbanos situados a más de 30 km del volcán. En este caso, el objetivo es establecer el tiempo necesario para salir de la zona de impacto, tomando como referencia una serie de núcleos de población por los que pasan las principales vías de comunicación. De hecho, en 1982 hubo una autoevacuación similar, dado que el ejército no pudo intervenir en el primer momento (De la Cruz-Reyna y Del Pozzo, 2009).

Para la delimitación del área a evacuar en el entorno del volcán Chichón se han utilizado las simulaciones de flujos piroclásticos y flujos gravitacionales realizadas en el Ejercicio para la Evaluación del Plan de Emergencia del Volcán Chichón. Los elementos que hemos tenido en cuenta para caracterizar la zona de estudio y que justifican los escenarios propuestos, son los siguientes:

- *Capacidad de acceso a información para autoprotección.* Debido al escaso desarrollo del área próxima al volcán, el acceso a la información para la autoprotección viene dado directamente por las autoridades. También se trabaja en los centros escolares con la población más joven.
- *Niveles de educación en riesgo y autoprotección.* Aunque existen numerosas campañas formativas y educacionales, debido a la escasa formación de la población más próximas al volcán y las dificultades de comunicación por no hablar castellano, en muchos casos, resulta difícil evaluar la situación real. Las agencias de protección y educación realizan un esfuerzo notable en este sentido y todavía permanece vivo el recuerdo de la erupción de 1982, aspecto que capacita a esta población frente a una eventual reactivación volcánica.
- *Interacción de la agencias de protección con las comunidades afectadas.* La Protección Civil en México se creó en 1986 a raíz del terremoto que afectó a la ciudad de México en 1985. Actualmente posee una estructura jerarquizada que abarca todas las administraciones, Federal, Estatal, Municipal, etc. Está formada por profesionales, apoyados por cuerpos de voluntarios y, debido a la frecuencia con la que ocurren los fenómenos naturales adversos, deben realizar intervenciones importantes y frecuentes a lo largo del año. Paralelamente, mantienen numerosas campañas informativas, educacionales y trabajan directamente con la población.
- *Confianza en el estamento científico y en las agencias de protección.* Como consecuencia de la erupción de 1982, no hay mucha confianza en el estamento científico aunque se está trabajando intensamente en la zona, especialmente el Departamento de Ciencias de la Tierra de la UNICACH. También, Protección Civil,

fundada con posterioridad a la erupción, trabaja constantemente en muchos puntos del estado de Chiapas para mejorar esta relación.

- *Existencia de un Plan de Emergencia.* El Plan de Emergencia está en desarrollo, de hecho, el ejercicio realizado forma parte de las acciones que se están llevando a cabo para su mejora e implantación. En breve quedará definido y podrá ser presentado a la población con todas las garantías.
- *Nivel de actividad del volcán.* En la erupción de 1982, los habitantes se quejaron a las autoridades repetidas veces de oír ruidos, sentir temblores, etc. Esta actividad previa comenzó en 1980 y fue incrementándose hasta el momento de la erupción (De la Cruz-Reyna y Del Pozzo, 2009). Si la próxima erupción del volcán Chichón siguiera una pauta similar, presentaría actividad sentida antes de la erupción.

Tabla 14.: Tipologías, parámetros y datos generales de las simulaciones aplicadas al entorno del volcán Chichón, Chiapas, México. Enero 2009.

Tipo vía	V. km/h	Capacidad	Características		
Autopista	80	32 ó 50	Doble sentido, dos carriles en cada dirección.		
C. Federal	60	16 ó 50	Doble sentido, 1 carril en cada sentido.		
C. Estatal	50	16 ó 50	Doble sentido, 1 carril en cada sentido.		
C. Pavimentado	40	8 ó 50	Doble sentido, 1 carril en cada sentido.		
Terracería	20	8 ó 50	Doble sentido, 1 carril en cada sentido. Pista de tierra.		
Brecha	10	4 ó 50	Doble sentido, Sin carriles definidos. Pista de tierra		
Vereda	5	32 ó 50	Doble sentido, sin carriles definidos. Sendero de tierra.		
Parámetros					
Discretizados Temporal y espacial			Coordenadas del área de análisis		
Discretizado espacial (<i>dx</i>)	100 m.	Xmin	410544.98	Ymin	1843021.10
Discretizado temporal (<i>dt</i>)	2 seg.	Xmax	539137.70	Ymax	1992245.50
Modelo C. población 15 min		Modelo C. población 1.30 h		Modelo C. población 4 h	
Valor Medio (T1)	1000.0 seg	Valor Medio (T1)	5400.0 seg	Valor Medio (T1)	14400.0 seg
Dispersión (S1)	383.02	Dispersión (S1)	3179.65	Dispersión (S1)	4444.72
Fracc. Pobl (R1)	40%	Fracc. Pobl (R1)	0%	Fracc. Pobl.	60%
En las simulaciones solo se ha tomado 1 hora y 30 minutos o 4 horas, sin función bilobulada.					
Modelo de Velocidad					
Constante D.V c2	4	Constante D.V. c1	700		
Porcentaje ocupación (p1)	10%	Constante D.V c2	4		
Porcentaje ocupación (p2)	60%				

Datos generales y observaciones		
Población total a evacuar:	17918	Las poblaciones seleccionadas están en función de los escenarios planteados y de un área de seguridad de 3.5 kilómetros.
Nº total de puntos utilizados:	27206 - 17790	La red viaria representa 2702.87 km. En nivel de detalle alcanzado equivale aproximadamente a una escala de 1:20000. Para la segunda distribución zona, el número de puntos utilizado ha sido menor, descartando las vías de comunicación externas.
Distribución zonal 1	Contiene 18 zonas. La evacuación se dirige hacia Tuxtla Gutiérrez, capital del estado de Chiapas, situada al sur del volcán Chichón.	
Distribución zonal 2	Contiene 9 zonas. La población evacuada se aleja del volcán hacia los núcleos urbanos de Juárez, Teapa, Rincón Chamula, Chicoasén y Raudales Malpaso situados a más de 30 km del volcán.	
En la simulación no se ha tenido en cuenta la dirección de las vías de comunicación, se asume que todas permiten circular en ambas direcciones.		
Los tipos denominados <i>C. Federal</i> y <i>C. Estatal</i> son el equivalente aproximado a las carreteras comarcales o secundarias españolas. Las <i>Terracerías</i> son caminos amplios de tierra por los que, en general, puede circularse con cualquier tipo de vehículo. Las <i>Brechas</i> corresponden a caminos de tierra más estrechos y en peores condiciones, suelen requerir vehículos especiales para transitar por ellos con garantías. Las <i>veredas</i> son senderos estrechos por los que solo es posible ir a pie o con animales.		
Para simular las evacuaciones realizadas mediante transporte proporcionado por las autoridades, se ha reducido la velocidad máxima de las vías e incrementado la capacidad (50). Se considera que los atascos no deberían ser un elemento crítico cuando se lleva a cabo este tipo de evacuaciones organizadas. Para comparar los escenarios obtenidos, también se han utilizados valores de capacidad reducidos según el tipo de vía. En el caso de las veredas se ha mantenido un valor alto de capacidad en todas las simulaciones pues no tendría sentido que se formaran retenciones en ese tipo de vías.		
Los puntos de llegada no están limitados, tienen asignada una capacidad ilimitada para evitar retenciones en la simulación.		
Todos los escenarios han sido simulados aplicando la misma función de comportamiento de la población a todas las zonas disponibles. No existen datos reales que permitan definir las funciones de comportamiento para los habitantes de la zona de estudio. Para comparar los resultados obtenidos, en cada simulación se ha variado la función de comportamiento de la población en base a estimaciones derivadas de nuestra experiencia.		
Los escenarios corresponden a evacuaciones realizadas antes de que comience el fenómeno eruptivo.		
Escenarios definidos		
<p>1. Evacuación organizada con población preparada y un solo destino. Se utiliza la distribución zonal 1, en simultáneo y con una función de comportamiento de la población: normal de 1:30 horas. Se reducen las velocidades, simulando las alcanzadas por el transporte en convoy y se varía la capacidad de las vías; homogénea y variable. Hay una alerta oficial y se fija el momento para realizar la evacuación, la población se incorpora en un corto espacio de tiempo. El destino es Tuxtla Gutiérrez.</p>		

2. Evacuación organizada con población preparada y múltiples destinos. Se utiliza la distribución zonal 2, en simultáneo y con una única función de comportamiento de la población: normal de 1:30 horas. Se reducen las velocidades, simulando las del transporte en convoy y se varía la capacidad de las vías; homogénea y variable. Hay una alerta oficial y se fija el momento para realizar la evacuación, la población se incorpora en un corto espacio de tiempo. Los destinos son múltiples, alejados del volcán más de 30 km.

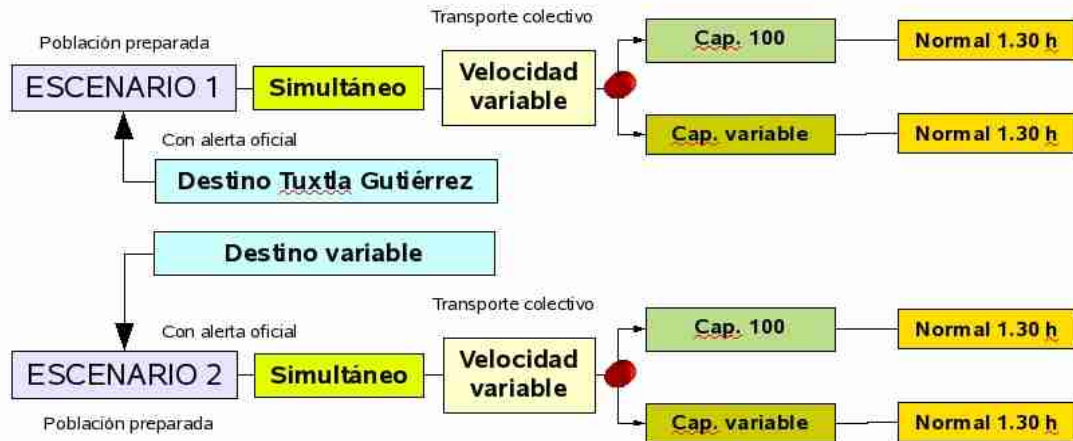


Figura 110: Esquema de simulaciones de evacuación para las localidades situadas en las proximidades del volcán Chichón, Chiapas, México. Se ha variado la capacidad de las vías para comparar los resultados obtenidos. La capacidad con valor 50 es igual para todos los puntos, minimiza cualquier atasco, situación acorde con el uso de transporte en convoy. En todos los puntos se mantiene la velocidad variable, en función del tipo de vía.

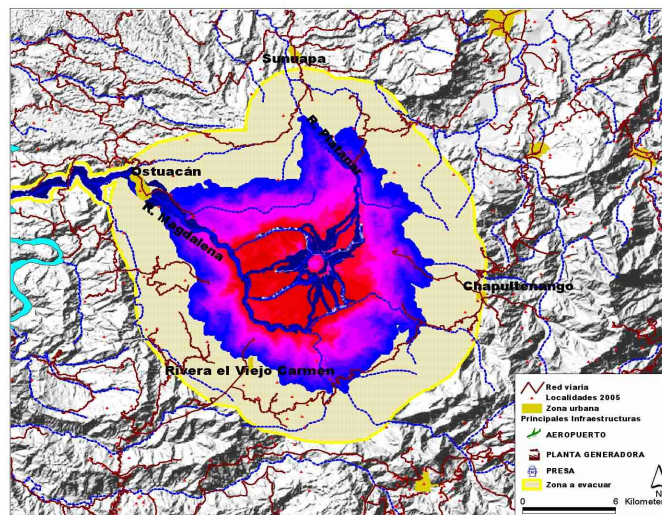


Figura 111: Establecimiento del área de evacuación para el entorno del volcán Chichón, México, a partir de los escenarios máximos, buffer de 3.5 kilómetros para los flujos piroclásticos y 300 metros para los flujos gravitacionales.

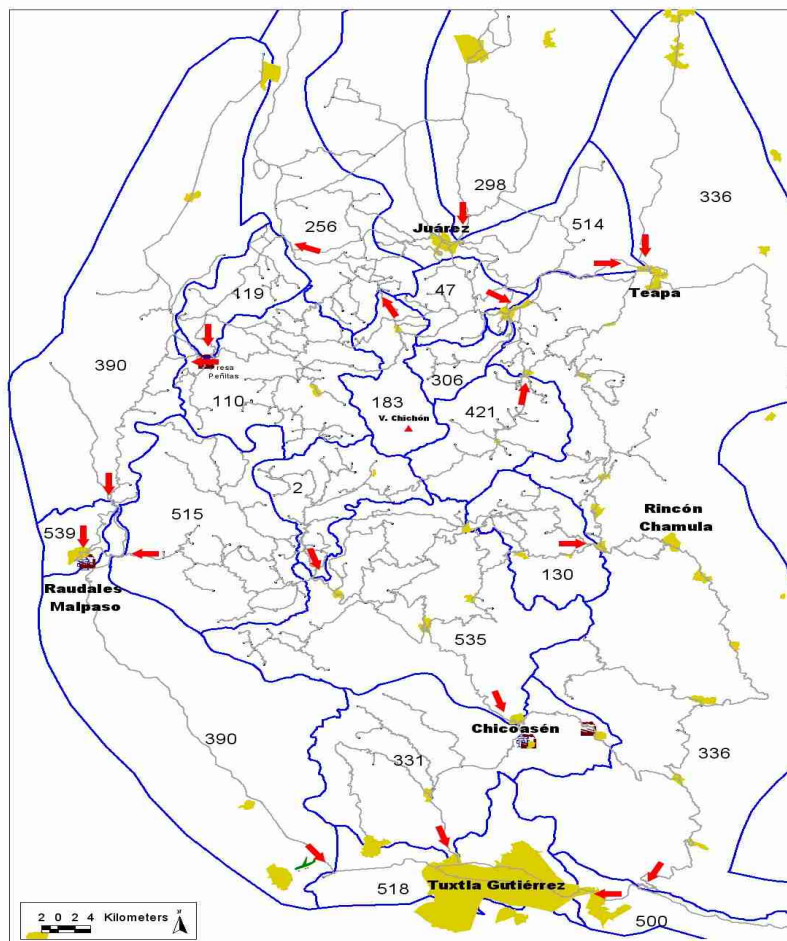


Figura 112.: **Distribución Zonal 1.** Esta distribución dirige a la población evacuada hacia la capital del estado, Tuxtla Gutiérrez, situada al sur del volcán Chichón, México. Los números de zona corresponden al valor del cruce de salida que poseen.

Tabla 15: Número de zona, superficie y población residente en la zona. Sólo se ha asignado la población de las localidades contenidas en los 15 primeros km.

Zona	Área km ²	Pob.	Zona	Área km ²	Pob.	Zona	Área km ²	Pob.
306	72.43	2140	119	141.34	0	539	73.30	0
110	381.92	6095	336	3219.72	0	514	678.45	0
2	203.64	1935	130	208.39	0	298	714.01	0
183	162.98	1390	535	793.73	1078	331	595.58	0
421	239.65	6984	515	529.09	0	500	290.53	0
47	116.15	870	390	2004.17	0	518	322.13	0
256	658.95	0						

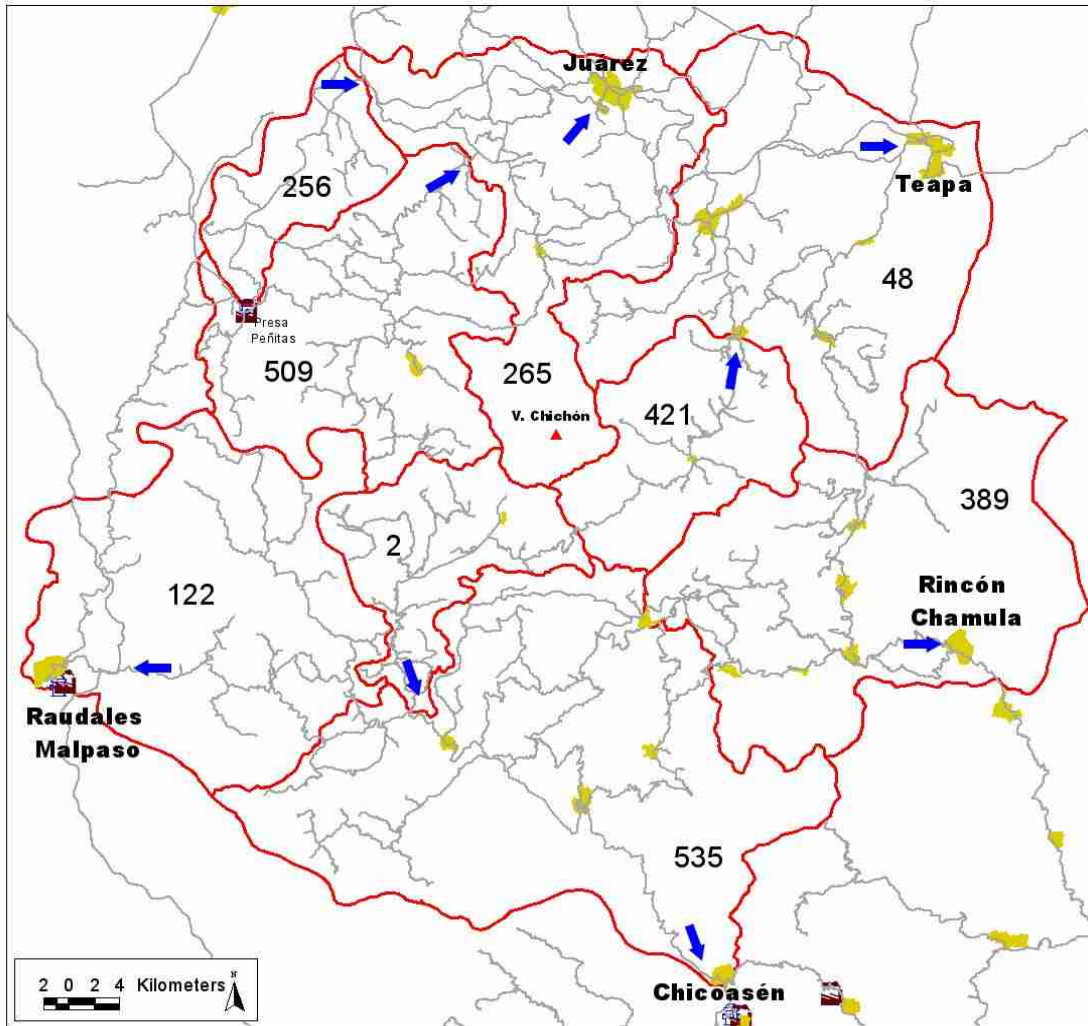


Figura 113.: Esta distribución dirige a la población evacuada hacia los núcleos urbanos de Juárez, Teapa, Rincón Chamula, Chicoasén y Raudales Malpaso, en función de su proximidad. Todos están situados a más de 30 km del volcán. Los números de zona corresponden al valor del cruce de salida que poseen.

Tabla 16.: Número de zona, superficie y población contenida. Sólo se ha asignado la población de las localidades contenidas en los 15 primeros km

Zona	Área km ²	Pob.	Zona	Área km ²	Pob.	Zona	Área km ²	Pob.
48	616.94	2140	265	469.19	2260	535	852.57	1078
421	239.65	6984	509	430.03	6095	122	572.64	2044
2	207.15	1935	389	639.98	0	256	141.34	0

4.9 Modelización

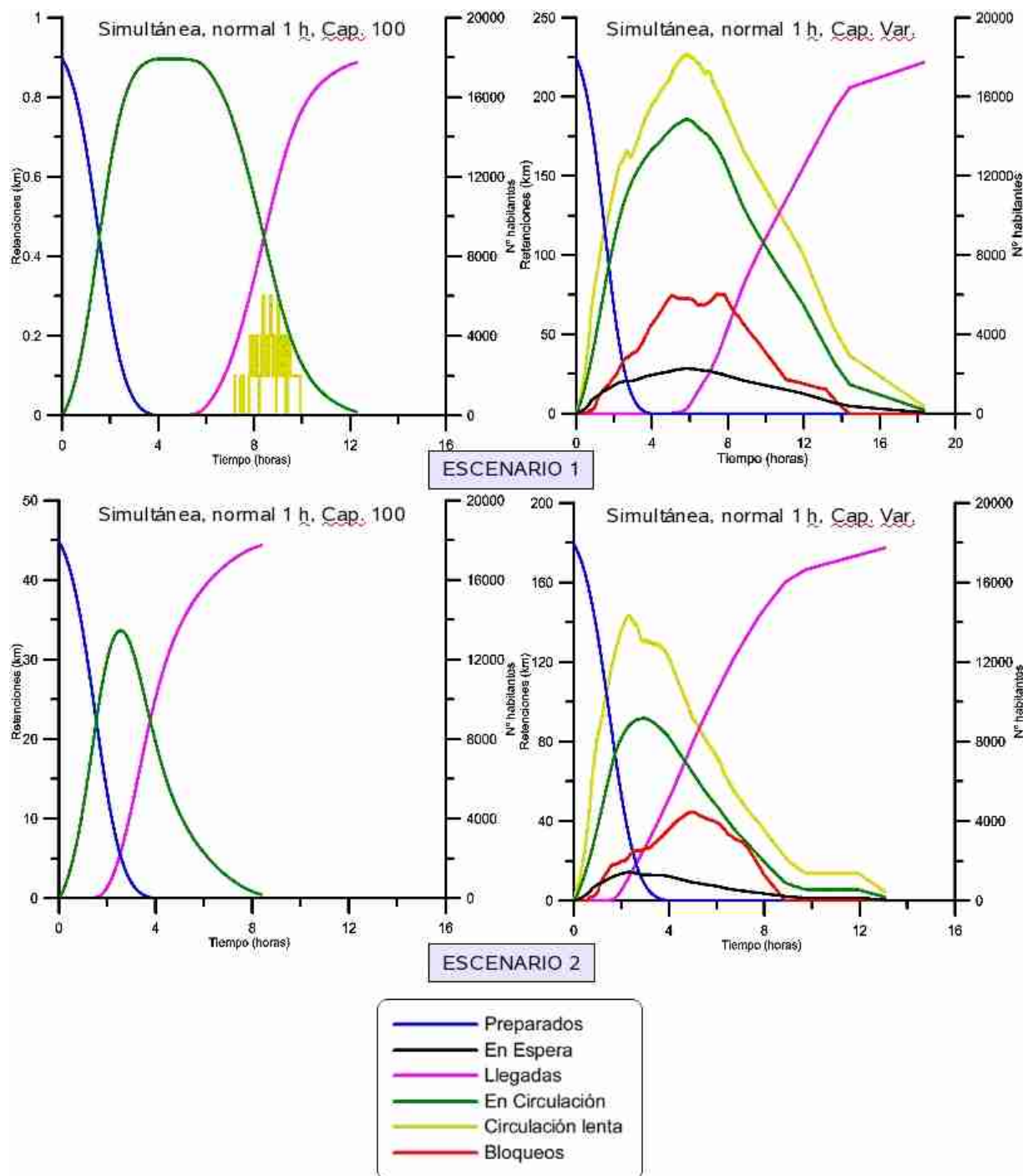


Figura 114: Representación gráfica del los escenarios 1 y 2, con variación en la capacidad de las vías de comunicación. Datos globales de llegadas al destino, personas preparados para evacuar, circulando, kilómetros de vías con circulación densa (atasco) y km de vías con retenciones (semáforo)

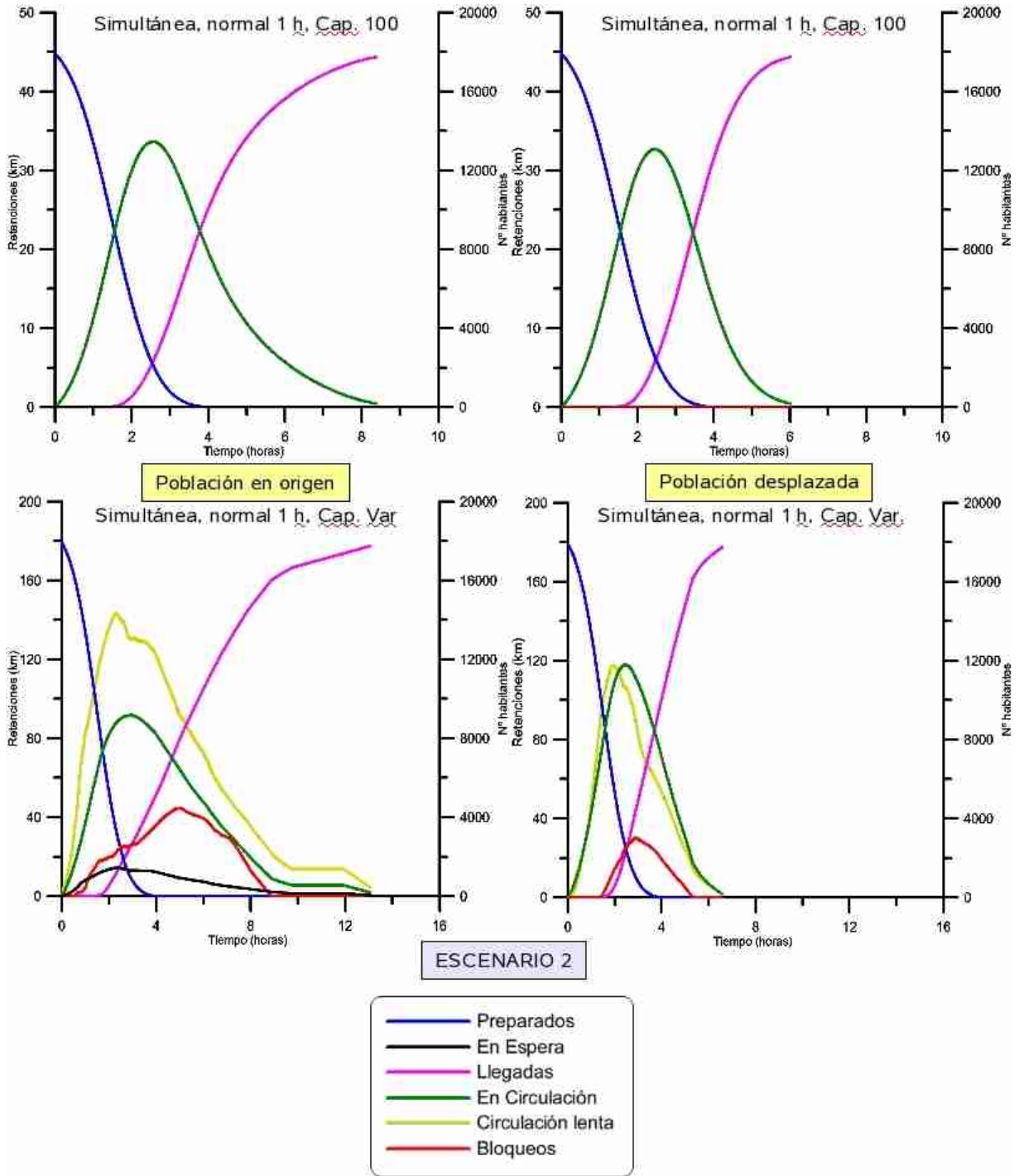


Figura 115: Escenario 2, simulaciones con población situada en su localidad original y con la población, cuyos acceso a las localidades depende de veredas, desplazada a vías de comunicación de mayor entidad.

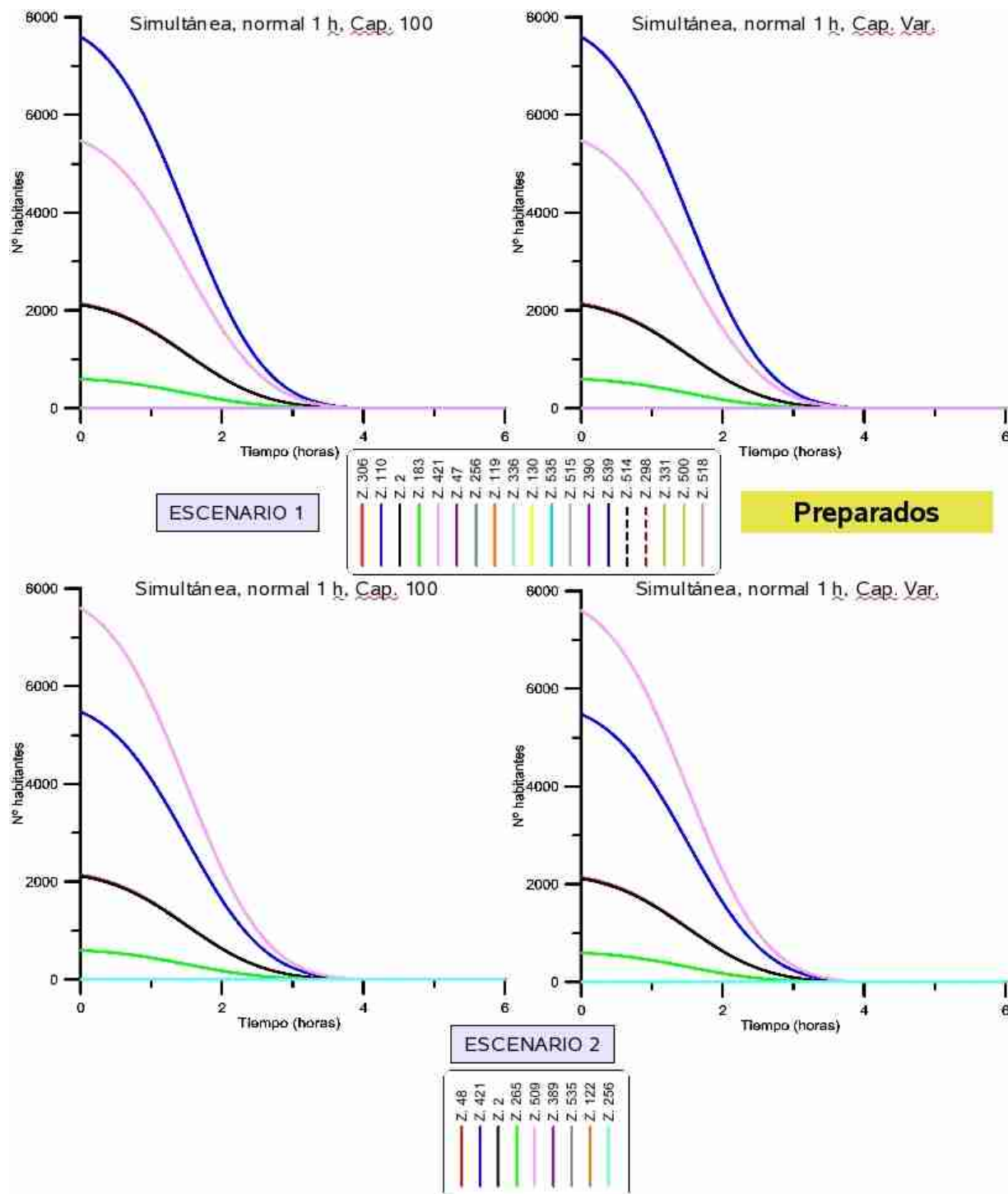


Figura 116: Se ha aplicado la misma función de comportamiento de la población en todas las simulaciones.

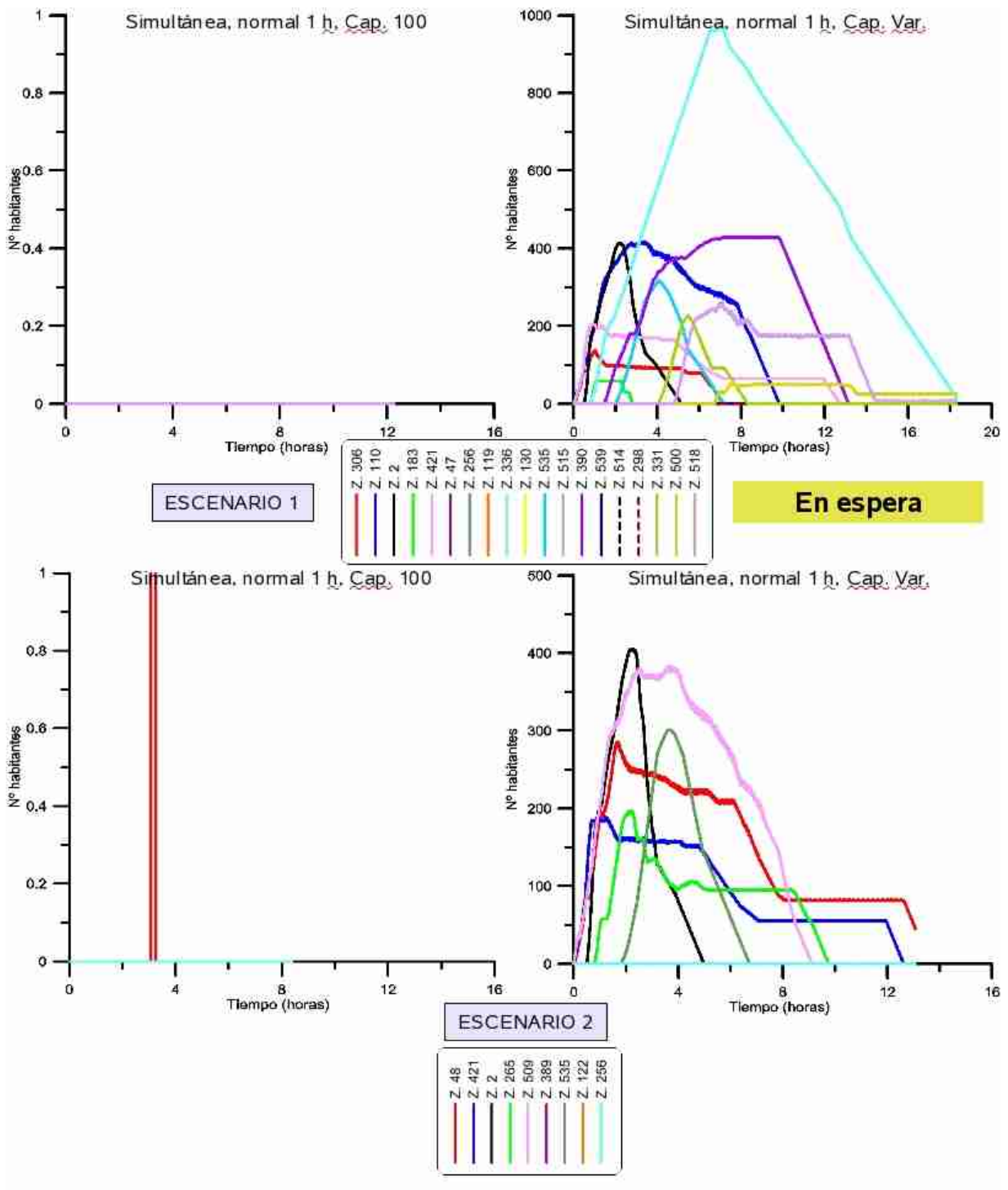


Figura 117: Tiempo de espera, condicionado por la saturación de las vías de comunicación.

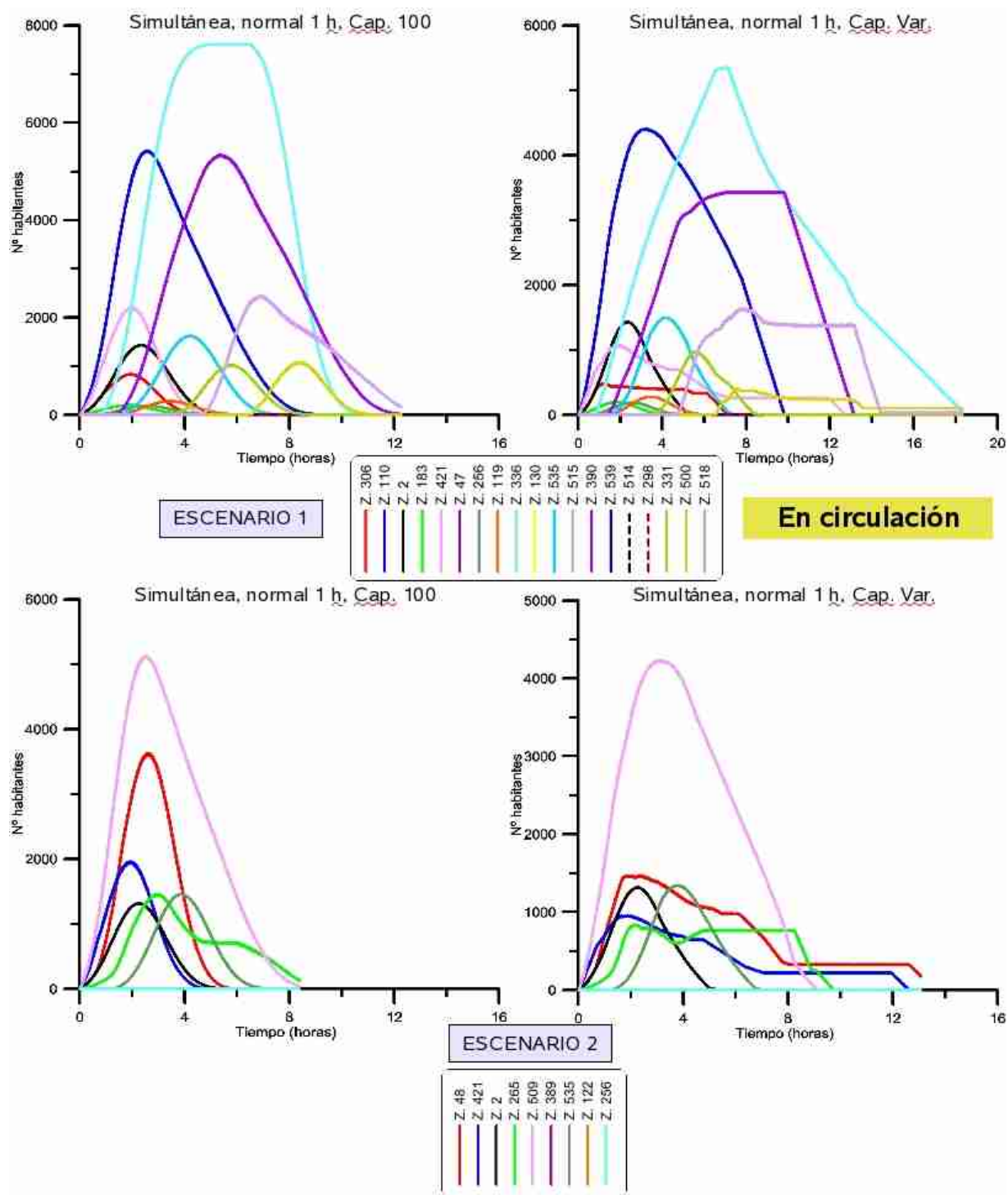


Figura 118: Evolución del número de personas en circulación por zonas.

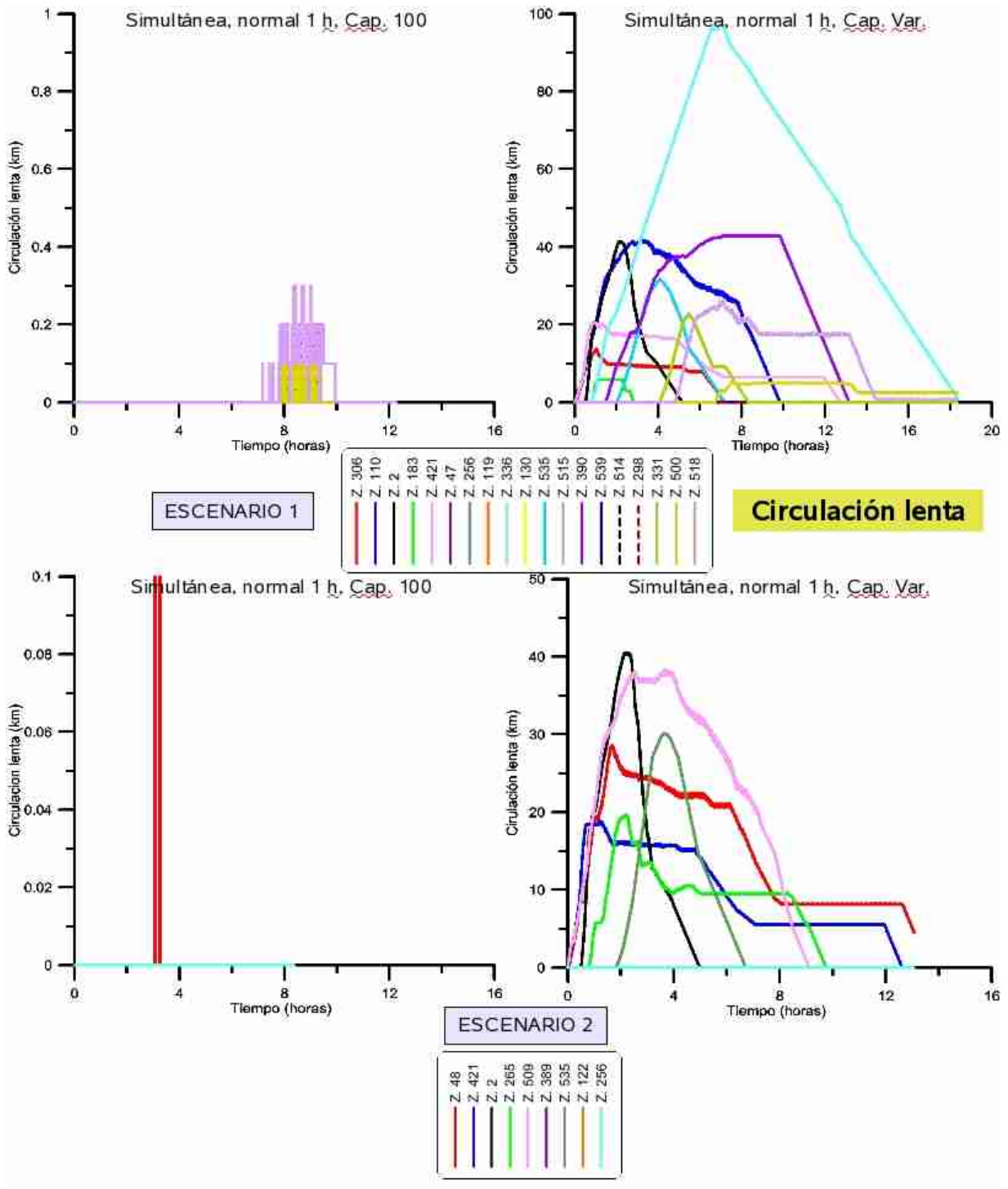


Figura 119: Evolución del número de kilómetros de vía con circulación lenta

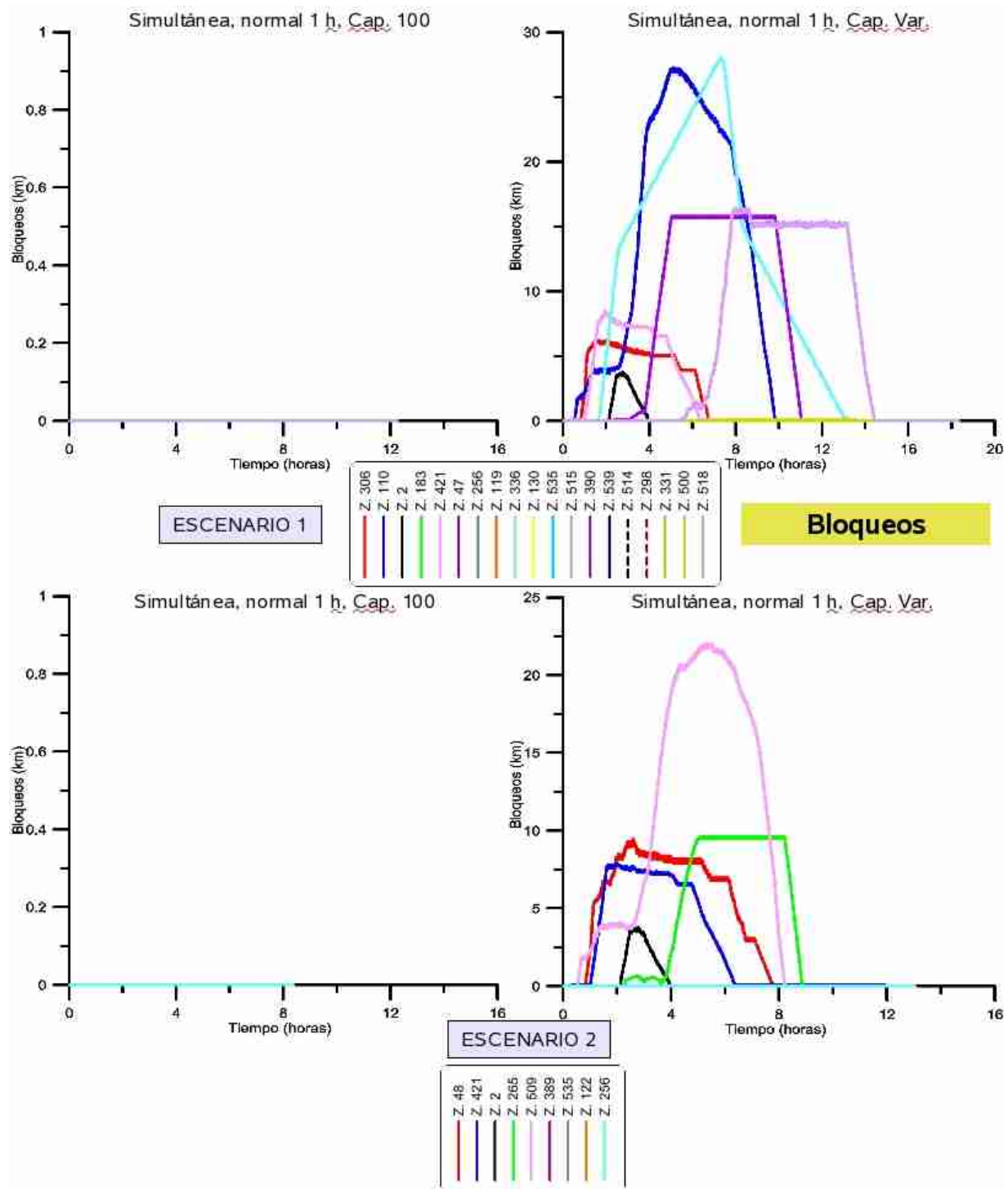


Figura 120: Evolución del número de kilómetros bloqueados temporalmente debido a la densidad de la circulación.

4.10 Resultados obtenidos

4.10.1 Tiempo de movilización

Para todos los escenarios y simulaciones realizados para el volcán Chichón se ha considerado una alerta temprana, en la que se fija la hora de evacuación con antelación y los agentes sociales y de Protección Civil disponen de tiempo para aleccionar a la población. Este escenario implica un *tiempo de preparación* reducido, con baja dispersión, dado que no se tiene en cuenta todo el intervalo temporal que transcurre desde que se produce la alerta hasta el inicio de la evacuación. El *tiempo de preparación* establecido representa el intervalo temporal desde que llega el transporte a una localidad, se organiza a los habitantes y comienza la salida.

En las simulaciones realizadas con capacidades de las vías de comunicación homogéneas (100), no se producen retenciones. En estos casos, el *tiempo de movilización* coincide con el *tiempo de preparación*. Estos escenarios simulan el transporte en convoy mediante la reducción de la velocidad y el incremento en el valor de capacidad; bajo estas condiciones no deberían producirse atascos.

En las simulaciones donde se utilizan valores bajos de capacidad para las vías de comunicación se producen retenciones, incrementando el *tiempo de movilización* cuando aparece gente en espera.

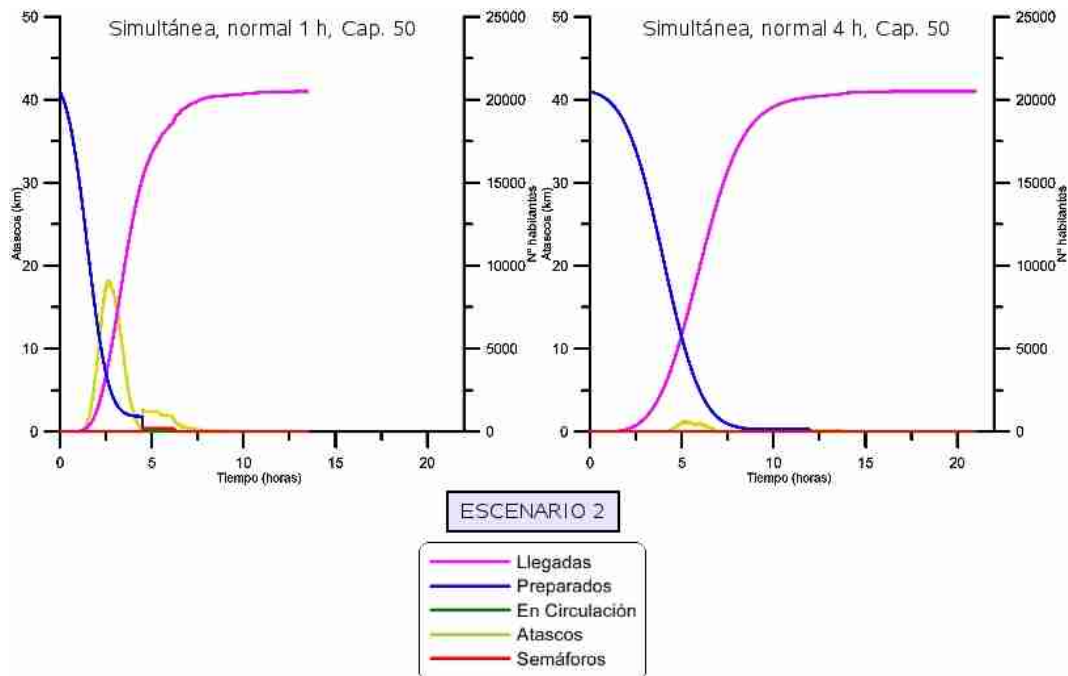


Figura 121.: Resultados para evacuaciones con tiempo medio de incorporación de 1:30 y 4 horas, para vías de comunicación con capacidad alta.

Como puede observarse en la gráfica anterior, cambiando únicamente el valor del *tiempo de preparación* el *tiempo de evacuación* varía considerablemente.

El tiempo de espera solo se ve reflejado en las simulaciones donde se han asignado valores de capacidad más bajos para todas las vías de comunicación, excepto para las veredas en las que se mantienen los valores altos. En estas simulaciones se producen más retenciones y, como consecuencia, el número de personas en espera también se incrementa.

4.10.2 El tiempo de viaje

En el caso estudiado para el volcán Chichón, las distancias a recorrer son más largas que en el caso estudiado para el volcán Teide, en el municipio de Icod de los Vinos, España. Las llegadas a destino en el escenario 1, en Tuxtla Gutiérrez, se producen aproximadamente a las 5 horas del inicio de la evacuación, cuando el 100% de los habitantes ya han salido de sus casas y están en espera o incorporados a la evacuación. En el escenario 2, dado que los puntos, de destino están más próximos, las llegadas se producen una hora después de iniciado el proceso de evacuación, coincidiendo con un 50% de habitantes preparados para evacuar. Esta relación de inicio y comienzo de las llegadas se observa en las curvas que corresponden a los habitantes que están preparados para evacuar (azul) y las de llegada (violeta).

La definición del valor de capacidad es fundamental a la hora de evaluar la problemática de la red de comunicaciones desde el punto de vista de los atascos o retenciones. Si bien los escenarios principales diseñados para el volcán Chichón están basados en el uso del transporte proporcionado por las autoridades, incrementando la capacidad para evitar las retenciones, también se han simulado escenarios con capacidad de las vías más reducidas. La situación en un caso y otro, tal como reflejan las gráficas, muestran diferencias notables. Entre las simulaciones con capacidad elevada y reducida, observamos un incremento notable del tiempo de evacuación, que alcanza un valor doble.

4.10.3 Tiempo de evacuación.

Los tiempos de evacuación obtenidos muestran un intervalo entre 12.26 y 18.33 horas para el primer escenario y 8.38 y 13.07 horas para el segundo, con un *tiempo de preparación* de 1.30 horas común. Sin embargo, el *tiempo de evacuación* está condicionado por 3486 personas que residen en localidades cuya única vía de acceso es una vereda. La velocidad de desplazamiento en este tipo de vías de comunicación es muy baja, dado que solo se pueden transitar a pie, y constituyen aproximadamente unos 24 kilómetros dentro la zona a evacuar. Para ambos escenarios, la curva de llegadas en las simulaciones con capacidad variable muestra un punto de inflexión por encima de los 18000 habitantes, con una duración aproximada de 4 horas. Para comparar la influencia en el *tiempo de evacuación* de la población residente en estas localidades, se ha generado una segunda simulación con el escenario 2, situando este contingente en vías de comunicación de mayor entidad. Los resultados obtenidos muestran tiempos de evacuación de 6.02 y 6.50 horas para capacidad 100 y capacidad variable, lo que supone una reducción de de 2.36 y 6.57 horas respectivamente.

CAPITULO 5

Aplicación al volcán Popocatepetl



Foto R. Ortiz, 2006.

5 Aplicación al volcán Popocatépetl

5.1 Introducción

El volcán Popocatépetl, la *Montaña que Humea* en lengua náhuatl, actualmente se encuentra en un proceso de actividad eruptiva casi continua, cuyo inicio se produjo en diciembre de 1994. El alto grado de peligrosidad que posee y el incremento paulatino del riesgo debido al constante crecimiento de la población, en especial por su cercanía a las ciudades de México D.F. y Puebla, ha obligado a las autoridades y a los científicos a desarrollar un complejo sistema de vigilancia y establecer un Plan de Emergencia que ya ha sido puesto en práctica en numerosas ocasiones. Esta circunstancia es la que ha motivado su elección para incluirlo en este trabajo; el Plan de Emergencia tiene contempladas varias rutas de evacuación, de las que se tienen numerosos datos sobre su funcionamiento y eficacia. Por tanto, nuestro objetivo es aprovechar este conocimiento para calibrar el simulador de evacuaciones. De las diferentes zonas posibles, se han escogido las rutas pertenecientes al estado de México, entre otras cuestiones, por la documentación inédita obtenida gracias a la colaboración de Protección Civil del Estado de México, que nos permite comprender mejor cómo se desarrollaron las evacuaciones y los problemas que se plantearon.



Figura 122: Crecimiento de del domo en el interior del cráter del volcán Popocatépetl (foto R. Quaas, 10/12/1997)

5.2 Características

El volcán Popocatepetl es uno de los numerosos volcanes situados en la Faja Volcánica Transmexicana, concretamente en el extremo sur de Sierra Nevada (19.02° N y 98.62° W), en la que se localizan también otros volcanes, el más próximo es el Iztaccíhuatl. Alcanza una altitud de 5452 m y 3000 m desde su base, posee forma cónica con una extensión aproximada de 25 km de perímetro inferior y está cubierto por un glaciar que en los últimos años ha disminuido considerablemente su extensión.



Figura 123: Situación de los Estados de México, Morelos y Puebla y localización del volcán Popocatepetl, México.

El volcán Popocatepetl estuvo precedido por otros edificios volcánicos que colapsaron. Se distinguen varias fases y ciclos, el primer volcán, el Nexpayantla, colapsó parcialmente hace 200000 años, dando lugar a una caldera. En su interior comenzó la formación de un nuevo volcán, el Fraile y, a partir de los depósitos de avalancha estudiados, se han detectado cuatro episodios de colapso distintos que cubren una distancia máxima de 75 Km (Macías, 2005). El primero de los depósitos se cree que está asociado al Iztaccíhuatl, cubre un área aproximada de 50 km^2 y se extiende en dirección sureste. Los otros tres están asociados al Popocatepetl, se extienden en dirección sur. El más reciente se ha datado hace unos 23000 años, recorriendo una distancia mínima de 70 km y cubriendo una superficie aproximada de 900 km^2 y se han estimado unos 9 km^3 de material emitido (Robin et al., 1987 en Macías, 2005, Siebe et al., 1995). A partir de este episodio comienza la formación del volcán Popocatepetl tal como se le

conoce hoy en día. En estas fases iniciales predominan las lavas andesíticas y dacíticas sobre las que ahora se asienta el edificio volcánico (Siebe et al., 1995, Macías, 2005).

El edificio actual mantiene características similares en cuanto a la composición del material emitido en el pasado y su elevado crecimiento lo sitúa en una fase de madurez, desde el punto de vista de los grandes episodios destructivos mencionados con anterioridad (Siebe et al., 1995). En su dinámica eruptiva reciente, destacan cuatro eventos explosivos importantes (14000, 5000, 2015 y 1100 años AP.) y otros cuatro de menor intensidad (11000, 9000, 7000 y 1800 años AP.) (Siebe y Macías, 2004). Entre estos eventos, se producen otros con predominio de actividad efusiva, con frecuentes emisiones de coladas de lava, localizadas en el cráter que son las que han contribuido al crecimiento del edificio (Macías, 2005).

La actividad volcánica histórica registrada por el volcán Popocatépetl, es a partir del año 1354 DC. Este periodo mantiene una dinámica muy similar, erupciones con una importante liberación de gases y arrastre de material del conducto, alternando con fases de crecimiento y destrucción explosiva de domos de lava (De la Cruz-Reyna et al., 2001). Estas fases de reactivación pueden durar más de diez años. Destaca especialmente el importante volumen de emisión de gases, no solo en fases de reactivación, sino también en otras de relativo reposo. De hecho, el comienzo de la actividad eruptiva en 1919 coincide con el fallecimiento de numerosos operarios que trabajaban en la extracción de azufre en el cráter del Popocatépetl, justo en el momento en que se produjo la primera de las explosiones.



Figura 124: Volcán Popocatépetl, México. Pequeña explosión con proyección de bombas que provocan numerosos incendios. Imagen tomada por las cámaras de vigilancia automática del CENAPRED el día 08/03/2007. (Foto CENAPRED, 2007).

Tabla 17.: Actividad volcánica del Popocatepetl registrada en los últimos 23000 años (CENAPRED)

Fecha	Características
23,000a	Gran erupción tipo Sta. Helena destruye el edificio volcánico previo.
14,000a	Gran erupción pliniana, produce lluvias de ceniza y pómez sobre el Valle de México.
14,000-5,000a	Ocurren varias erupciones menores y, al menos, cuatro grandes erupciones.
3,000b	Erupción grande.
200b	Erupción grande.
800c	Después de la última erupción explosiva, la actividad del Popocatepetl ha sido moderada. A lo largo de los últimos 1200 años se han presentado numerosos episodios de actividad similar a la actual. Algunos de ellos están documentados.
1354c	Erupción menor.
1363c	Fumarolas.
1512c	Fumarolas.
1519c	Erupción moderada seguida de actividad fumarólica.
1530c	Termina actividad fumarólica.
1539-1549c	Erupción moderada. Explosiones esporádicas moderadas, emiten ceniza y pómez.
1571c	Emisiones de ceniza.
1592c	Fumarolas y emisiones de ceniza.
1642c	Fumarolas y emisiones de ceniza.
1663c	Erupción moderada. Explosiones esporádicas moderadas, emiten ceniza y pómez.
1664c	Emisiones de ceniza.
1665c	Emisiones de ceniza.
1697c	Fumarolas.
1720c	Erupción leve y actividad fumarólica.
1804c	Fumarolas leves.
1919 - 1927c.	Erupción moderada. Explosiones esporádicas moderadas, emiten ceniza y pómez. Se forma un pequeño domo de lava en el fondo del cráter. Hubieron algunas víctimas en el interior del cráter al realizar trabajos de explotación de azufre.
1994-1997...	Erupción moderada. Explosiones esporádicas moderadas, emiten ceniza y pómez. Se forma un domo de lava en el fondo del cráter que alcanza el 20% de su capacidad. 5 personas perecieron cerca del borde del cráter durante una explosión ocurrida en mayo de 1996.
1996. (a) Años atrás (b) Antes de Cristo- BC (c) Después de Cristo- AD	

5.3 La actividad eruptiva en la actualidad

A fines de 1992 y durante 1993 comenzó a incrementarse la actividad fumarólica y sísmica del volcán Popocatepetl hasta que el 21 de diciembre de 1994 (De la Cruz-Reyna et al., 2001) se produce la primera de las erupciones del ciclo en el que aún se encuentra inmerso y que dura ya quince años. Durante esta fase eruptiva, se han producido al menos 25 domos, destruidos completa o parcialmente por explosiones. El primero se formó en 1996 y el más grande de ellos a finales del año 2000 (Armienta et al., 2008).

El momento más crítico de la actual fase se produjo en diciembre de 2000, debido a un notable incremento de la actividad volcánica. A partir del 12 de diciembre comenzó el crecimiento de un nuevo domo con alta tasa de extrusión y emisión considerable de SO_2 que se acercó a las 100000 Tm/día (el promedio anual es de 5000 Tm/día). En pocos días, la energía sísmica acumulada del volcán superó considerablemente la acumulada de otros años, los inclinómetros registraron amplitudes de 200 microradianes y se llegó a calcular un volumen de lava en el cráter entre 15000 y 19000 m^3 (Valdés-González et al., 2001). Pese a todo, la dinámica eruptiva posterior fue menos explosiva de lo esperado, aunque obligó a llevar a cabo una evacuación preventiva de 41000 personas aproximadamente.

En la actualidad, el volcán Popocatepetl continúa en actividad y el semáforo para la población permanece en amarillo.



Figura 125: Semáforo para el volcán Popocatepetl en uno de los peajes de la autopista México D.F. - Puebla. (Fotos J.M. Marrero 2002)

5.4 Aplicación del cuestionario USGS

Nivel de amenaza que presenta un volcán según la metodología propuesta por el United States Geological Survey (USGS) (Ewert et al., 2005). Relaciona diversos factores de peligrosidad con otros de exposición.

Factores de peligrosidad volcánica	
Tipo de volcán	1
Índice de Explosividad Volcánica Máxima	2
¿Ha tenido actividad explosiva en los últimos 500 años?	1
¿Cual ha sido la actividad explosiva máxima en los últimos 5000 años?	1
Periodo de retorno o recurrencia.	4
¿Ha tenido flujos piroclásticos en el Holoceno?	1
¿Ha tenido lahares en el Holoceno?	1
¿Ha tenido coladas de lava en el Holoceno?	0
¿Tiene potencial para producir explosiones hidrotermales?	1
¿Ha producido Tsunamis en el Holoceno?	0
¿Tiene potencial para generar colapsos sectoriales?	1
¿Puede generar lahares primarios?	1
Actividad sísmica observada.	1
Deformación del suelo observada.	1
Actividad fumarólica o desgasificación magmática observada.	1
Suma total de factores de peligro	17
Elementos expuestos	
Log ₁₀ de la población residente a menos de 30 km del volcán.	5
Log ₁₀ de la población residente aguas abajo o aguas arriba del volcán.	5
¿Ha causado muertos en periodo histórico?	1
¿Han habido evacuaciones en periodo histórico?	1
Aviación local expuesta	1
Aviación regional expuesta	4
Infraestructuras de energía expuestas	1
Infraestructuras de transporte expuestas	1
Áreas muy desarrolladas o sensibles expuestas	1
El volcán ocupa un área importante de una isla poblada	0
Suma total de los factores de exposición	20
Total de factores de peligro x Total de factores de Exposición = Threat Ranking	340
Nivel Amenaza: Muy Ato: 324-124 // Alto: 123-64 // Moderado: 63-30 // Bajo: 30-6 // Muy bajo: 6-0	

El volcán Popocatepetl es de muy alta amenaza, afecta a dos ciudades importantes, Puebla y México D.F., y sus correspondientes infraestructuras de energía, transporte, suministros, etc. Desde que se inició la presente fase eruptiva, el volcán ha sido ampliamente instrumentado y puede considerarse que cuenta con uno de los mejores sistemas de monitoreo, gestionado por el CENAPRED con la cooperación del Instituto de Geofísica de la UNAM. Paralelamente, la Protección Civil de los distintos Estados afectados, coordinada por la Federal, desarrolla una intensa labor en las áreas más sensibles del volcán.

El mapa de peligros del volcán Popocatepetl, publicado en 1995, refleja el esfuerzo científico para dotar de una herramienta básica a Protección Civil para la gestión de la emergencia. De este mapa se han realizado versiones simplificadas para mejor comprensión de la población y facilitar a los técnicos la planificación de la emergencia (De la Cruz-Reyna, 2004). El área en rojo se corresponde con la zona de exclusión total, a donde sólo puede accederse con permiso especial bajo supervisión del CENAPRED. En periodos de relativa calma del volcán está autorizado el cruce por el Paso de Cortés que supone un considerable ahorro de tiempo para el tránsito entre las poblaciones situadas al este y oeste del volcán. En las áreas naranja y amarillo se encuentran las zonas pobladas más expuestas, que deben ser evacuadas cuando se detecta un incremento importante de la actividad volcánica.

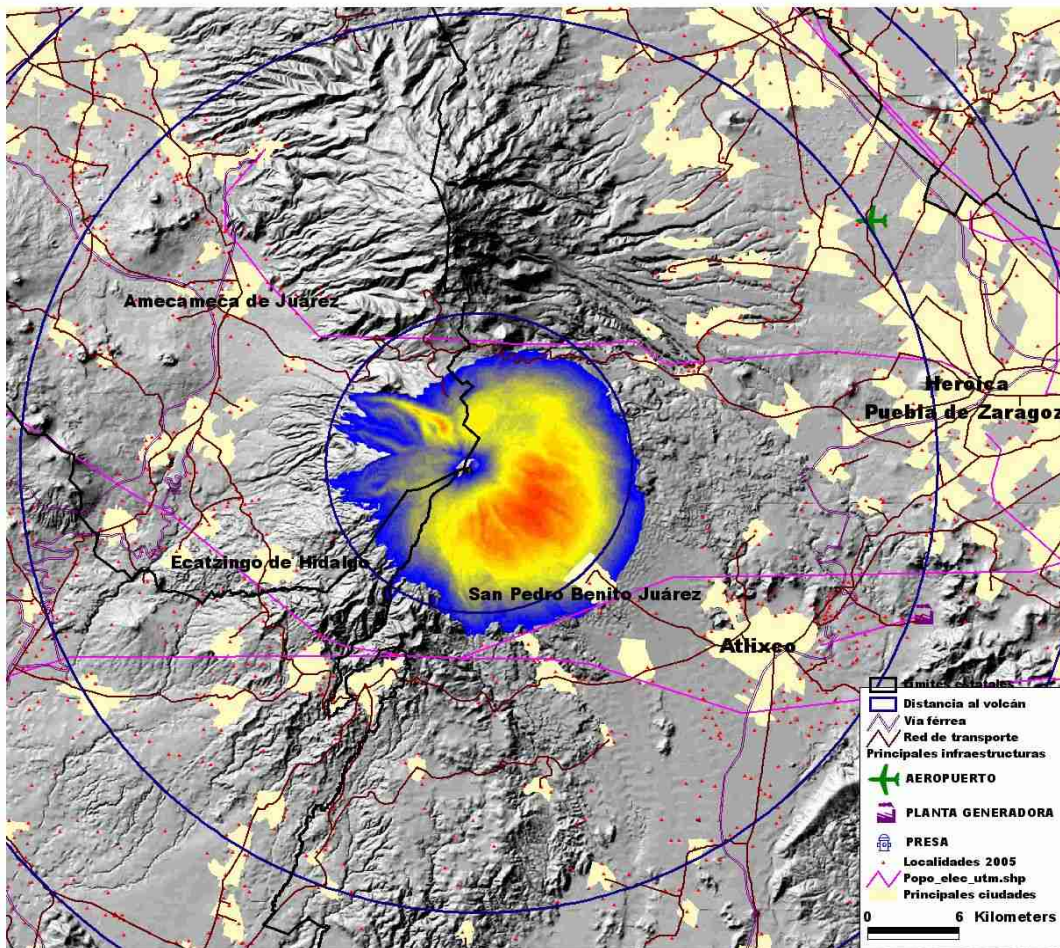


Figura 127: Modelización mediante cono de energía de la zona afectada por flujos piroclásticos en el volcán Popocatepetl, México, utilizando un modelo modificado de Felpeto (2002, 2007). Altura del cono equivalente a 250 m. Obsérvese que el área obtenida coincide aproximadamente con el mapa de peligros. Parámetros: Centro emisión 539990.0, 2103083.0; Altura de colapso 250 m.

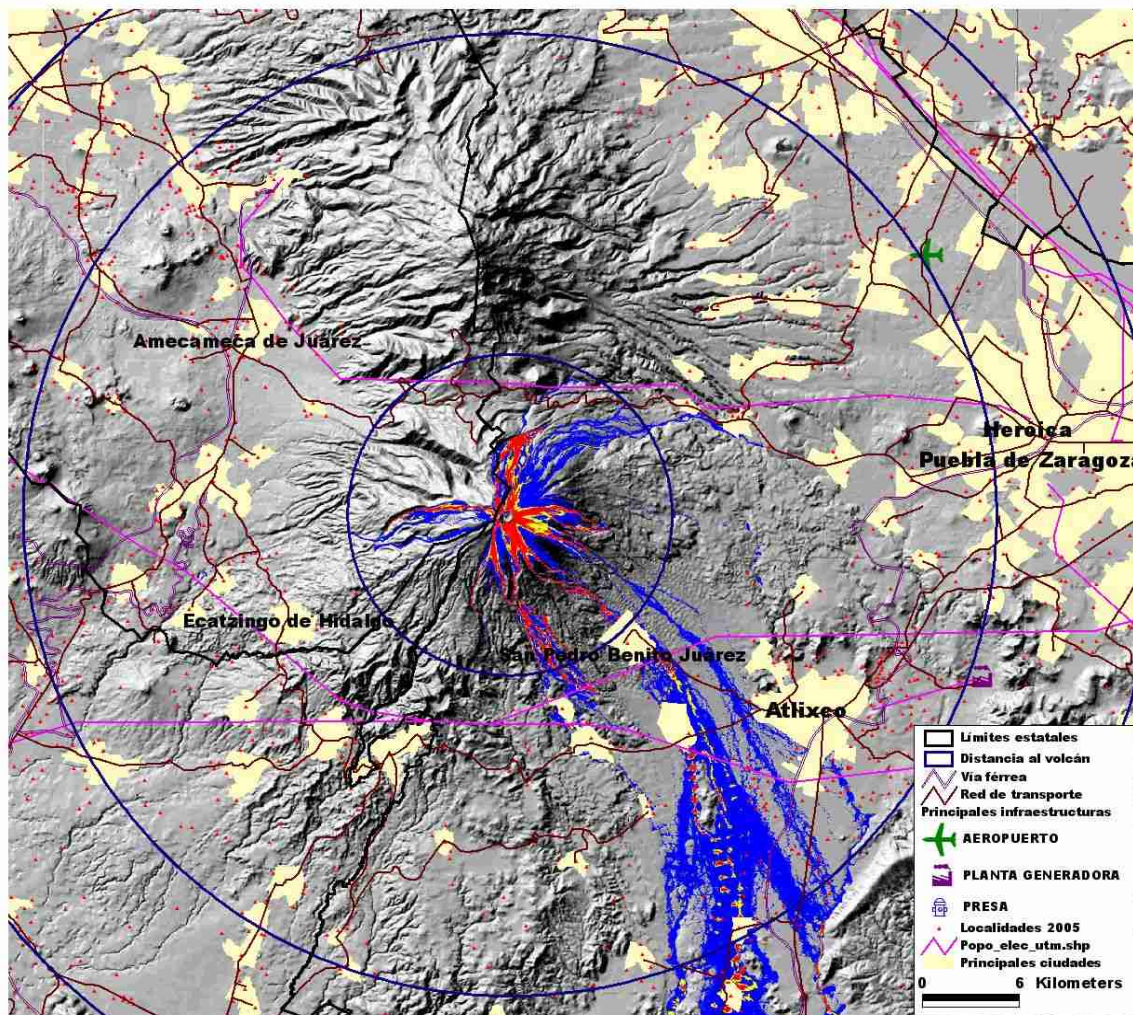


Figura 128: Modelización de flujos gravitacionales para el volcán Popocatepetl, México, utilizando un método de Montecarlo modificado de Felpeto, 2002. El resultado obtenido refleja la ruta que seguirían los lahares y otro flujos con control topográfico. La morfología actual del cráter favorece la dirección norte, como ocurrió el 22/01/2000. Hay que tener presente que el modelo digital utilizado es anterior a 1982 y que la simulación se ha realizado en modo simplificado. Parámetros el modelo: Recorrido máximo (celdas) 10000; N° caminos/centro 10000; N° centros 27; Altura crítica 10

5.5 Distribución de infraestructuras y población

Los asentamientos prehispánicos emplazados en las proximidades del volcán Popocatepetl, se vieron afectados por las erupciones plinianas ocurridas hace aproximadamente 5000, 2015 y 1100 años AP, tanto por los flujos y caída de material incandescente como por lahares. Estas erupciones destruyeron numerosos asentamientos humanos y dejaron inhabitable la zona durante décadas (Plunket y Uruñuela, 2008). En la actualidad, la población que podría verse afectada por una erupción de semejantes características supera los 25 millones de habitantes.



Figura 129: Una pequeña explosión en el cráter del volcán Popocatepetl genera un flujo piroclástico que se canaliza en la cañada nor-noreste del volcán y se detiene a sólo 2 km del pueblo Santiago Xalitzintla. Se muestra el corte del depósito en la zona terminal y un árbol quemado por la nube acompañante (Fotos, Cámara de vigilancia del CENAPRED (2000), CENAPRED (2001) y R. Ortiz (2002))

Para la valoración de la población afectada por la actividad del volcán Popocatepetl se ha utilizado el mismo método que en los volcanes Teide y Chichón, estableciendo una serie de anillos concéntricos al cráter y cruzándolos con la población residente en su interior. En este caso se han tomado los datos del Censo de Población de 2005, realizado por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía de México. En la tabla puede observarse que el número de personas que están expuestas ante la actividad volcánica del Popocatepetl alcanza un nivel importante, incluso en las zonas más próximas. A ello, hay que añadir el grado de dispersión que presenta la población en todos los anillos, lo que dificulta la logística ante cualquier intervención.

Tabla 18: Distribución de la población por proximidad al centro de emisión del volcán Popocatepetl, estado y grado de dispersión (localidades menores de 1000 habitantes).

Distancia	Estado	Población Total	Nº Localidades	Pob. Media	Pob. Máxima	Pob. Mínima	Pobl. >1000 hab	Nº Loc >1000 hab	Superficie km2
Global	Todos	25156784	7112	3537.23	1820888	0	698233	6109	29616.03
10 km	Todos	Sin Pobl.	-	-	-	-	-	-	0.06
10-30 km	Todos	604154	687	883.27	86173	1	54835	566	1796.68
	Morelos	60473	96	629.93	14524	1	3803	81	325.61
	México	202288	209	967.89	31422	1	13616	176	716.44
	Puebla	341393	379	900.77	86173	1	37416	309	1471.07
30-40 km	Todos	986537	646	1527.15	144311	1	64840	544	2198.99
	D.F.	-	-	-	-	-	-	-	23.57
	Morelos	94698	191	495.8	11592	1	22376	174	477.30
	México	322335	121	2663.93	144311	1	8235	98	437.60
	Puebla	533341	273	1953.63	82964	1	29112	222	1171.03
	Tlaxcala	36163	61	592.84	8291	1	5117	50	89.49
40-80 km	Todos	17742870	3410	5203.19	1820888	0	297353	2941	15078.86
	D.F.	8547606	464	18421.56	1820888	1	25266	432	1401.23
	Hidalgo	19224	106	181.36	2211	0	7950	99	384.07
	Morelos	1355278	872	1554.22	332197	1	82793	777	3159.63
	México	5004256	390	12831.43	1687549	1	39519	302	2002.29
	Puebla	1940786	745	2605.08	1399519	1	80382	649	5400.89
	Tlaxcala	875720	833	1051.28	55760	1	61443	682	2730.75
80-100 km	Todos	5823223	2372	2454.98	792226	0	281205	2058	11309.12
	D.F.	173310	18	9628.33	150482	4	1952	16	59.31
	Guerrero	6689	60	111.48	1339	0	3007	57	553.58
	Hidalgo	30266	315	96.08	2320	0	19229	308	971.19
	Morelos	102450	204	502.21	20561	1	23041	186	909.71
	México	5012522	765	6552.32	792226	1	1385512	576	3035.86
	Puebla	358418	683	524.77	25797	1	74222	610	4739.45
	Tlaxcala	103941	168	618.7	47286	1	13412	154	1040.02

Los efectos de la ceniza generan graves problemas en toda el área pero, sobre todo, en las zonas urbanas más desarrolladas. Desde el punto de vista de la salud, especialmente en la temporada de invierno, la ceniza se une al *smog* incrementando el nivel de contaminación del aire. Los aeropuertos deben cerrarse ante la presencia de ceniza, el agua puede quedar contaminada y las líneas eléctricas verse gravemente afectadas.

Dada la gran extensión del área de influencia del volcán Popocatepetl, en este trabajo nos centramos exclusivamente en la zona del estado de México, al noroeste del volcán, utilizando

las rutas de evacuación que cubren el área próxima. Esta zona la integran 12 municipios con un total de 468495 habitantes y 311 localidades.



Figura 130: Señalización del punto de reunión para la evacuación en la plaza de Amecameca, Estado de México. (Foto: R. Ortiz)

Tabla 19.: Municipios del Estado de México por donde discurren las rutas de evacuación utilizadas (INEGI, conteo de población de 2005).

Municipio	Nº localidades	Nº habitantes
Amecameca	45	48363
Atlautla	22	24110
Ayapango	18	6361
Chalco	62	245720
Cocotitlán	11	12120
Ecatzingo	6	6340
Juchitepec	23	21017
Ozumba	14	24055
Temamatla	25	10135
Tenango del Aire	19	9432
Tepetlixpa	24	16912
Tlalmanalco	42	43930

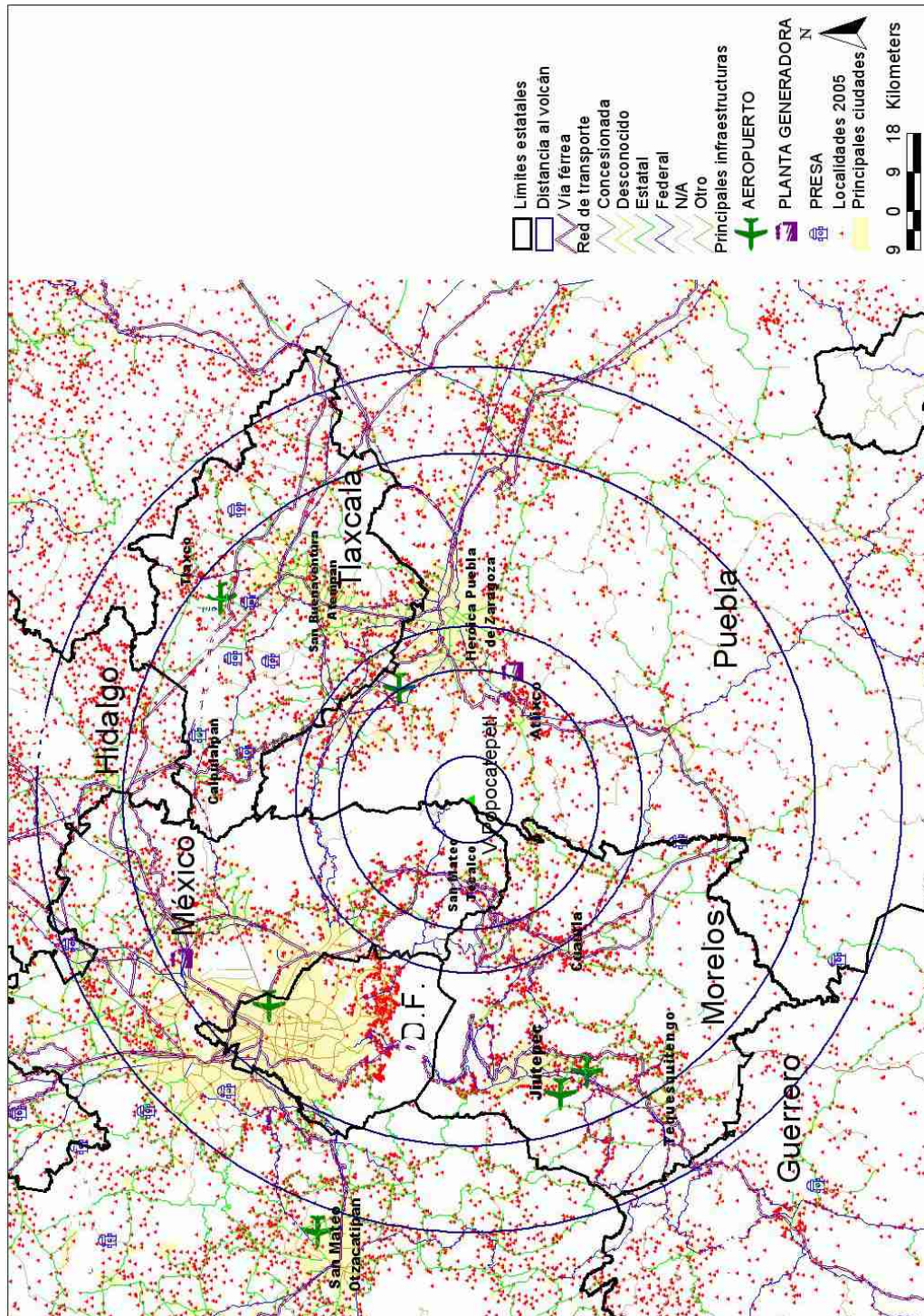


Figura 131: Mapa de distribución de la población, red viaria y algunas infraestructuras en el entorno del volcán Popocatepetl, México. Los anillos poseen los siguientes radios 10, 30, 40, 80 y 100 kilómetros respectivamente.

5.6 Plan de emergencia

Las bases principales del Plan de Emergencia del volcán Popocatepetl quedaron definidas en 1994, justo antes de que entrara en erupción por primera vez desde 1927. Hay dos publicaciones donde se recoge la base teórica del Plan de Emergencia (CENAPRED, 1994, CENAPRED-UNAM, 1995), tanto desde el punto de vista de la vigilancia e investigación como de la estructura operativa de Protección Civil. A lo largo de los años se ha ido incorporando nuevos trabajos de investigación, la red de vigilancia se ha mejorado y ha aumentado sustancialmente el número de personas potencialmente amenazadas por la actividad volcánica y, como consecuencia de ello, el Plan de Emergencia también ha tenido que adaptarse a la nueva situación. Puede encontrarse información actualizada en la página web del CENAPRED (www.cenapred.unam.mx).

En estudios geológicos recientes se ha constatado que no han vuelto a producirse erupciones superiores a un VEI 3, por lo menos en los últimos 650 años (Delgado-Granados et al., 2008), aspecto que está condicionando la percepción del riesgo de la población que actualmente reside en las proximidades del volcán.

5.7 Diseño de escenarios

El interés de incluir el volcán Popocatepetl en este trabajo, se debe a las evacuaciones que se han realizado en fecha relativamente reciente de las poblaciones próximas y, a la disponibilidad de datos que se tiene de ellas. Ambos elementos permiten realizar la modelización de una evacuación ya ocurrida y, de este modo, evaluar el modelo de evacuaciones.

La primera evacuación, relacionada con el periodo eruptivo actual del Popocatepetl, se produce el 21 de diciembre de 1994 en 19 localidades situadas en la zona este del volcán, perteneciente al Estado de Puebla y en ella se movilizaron, aproximadamente, 31000 personas (Vidal et al., 1995). En diciembre de 2000 el incremento de la actividad del volcán, condujo a la evacuación de las localidades próximas al volcán pertenecientes a varios Estados. Aunque la zona evacuada fue mucho más amplia y afectó a 41000 personas, hemos centrado la investigación en la que se llevó a cabo en el sector oeste del volcán, en el estado de México, por disponer de un conjunto de datos proporcionados por la Protección Civil de dicho Estado. Hay que tener en cuenta que durante una evacuación no es frecuente registrar datos para un posterior análisis científico del proceso y en general los pocos datos existentes, pasado un tiempo, no son fácilmente localizables.

Se incluye la secuencia temporal del proceso de evacuación realizado del 15 al 19 de diciembre de 2000 para ilustrar la problemática de gestión de una evacuación por la amenaza de un volcán, consecuencia de la dificultad que tiene el Comité Científico para emitir el pronóstico de la evolución de la actividad volcánica unido al pánico de la población y la complejidad de la toma de decisiones para la ejecución de la evacuación.

- **El 15/12/2000.**

- El Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), reporta el incremento de la actividad del volcán desde las 23:50 horas del día 14/12/2000. Se observa tremor de alta frecuencia con exhalaciones⁶ y material de proyección aérea que se repiten a lo largo del día con variaciones en la intensidad. El CENAPRED emite varios informes sobre el estado de la actividad del volcán, manteniendo el Semáforo de Alerta Volcánica en Amarillo Fase III y el área de exclusión a 7 km del volcán durante todo el día.
- 14:04 horas, el Director General de Protección Civil de la Secretaría de Gobernación, informa de la necesidad de preparar, para una evacuación preventiva, a la población residente en los caseríos situados próximos al área de exclusión, en ese momento fijada a 7 km. El Secretario General de Gobierno del Estado de México indica a la Dirección General de Protección Civil que ponga en alerta a las instituciones que conforman la estructura organizativa del Plan Operativo Popocatepetl, instalando el Centro de Operaciones en el municipio de Chalco.
- 18:30 horas, todas las instituciones implicadas en el Plan Operativo del Volcán Popocatepetl están bajo aviso.
- 19:00 horas, queda instalado el Centro de Operaciones en la Escuela de Artes y Oficios de Chalco
- 20:00 horas, llegan al Centro de Operaciones los representantes de las dependencias federales, estatales y municipales que participan en el Plan Operativo del volcán Popocatepetl.
- 21:30 horas, la Dirección General de Transporte Terrestre, de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes del Estado, solicita a los representantes de las agrupaciones de transportistas los vehículos necesarios para la evacuación. La Dirección General de la Junta de Caminos, de la misma Secretaría, envía personal para recorrer las rutas de evacuación y verificar el estado en el que se encuentran. La Dirección General de Educación se pone en contacto con los Directores de las escuelas incluidas dentro del Plan de Emergencia como refugios temporales, para que estén disponibles. El personal de la 37 Zona Militar inicia la instalación de los refugios temporales. La Dirección General de Abasto y Comercio solicita alimentos y enseres a través de distintos proveedores del Gobierno Estatal, Federal y Municipal. El Sector Salud, Federal y Estatal, prepara la estructura hospitalaria y solicita los medicamentos para atender las posibles emergencias médicas.
- **El 16/12/2000.**
 - 01:30 horas, en base a las recomendaciones del Comité Científico, Protección Civil decide evacuar las poblaciones más cercadas y expuestas a la actividad del volcán. El Gobernador del Estado ordena la evacuación de las poblaciones más

6 El término *exhalación* se utiliza en México para caracterizar explosiones con un bajo contenido en ceniza, aunque una de sus finalidades reales es disminuir la sensación de alarma en la población, evitando el uso del término *explosión*.

expuestas ubicadas en la zona de mayor riesgo. Se inicia la concentración de vehículos para la evacuación en los núcleos principales de los municipios de Amecameca, Atlautla, Ecatzingo y Ozumba, 70 unidades en cada uno.

- 01:45 horas, el Subsecretario de Seguridad Pública preside una reunión en el Centro Regional de Operaciones de la Dirección General de Protección Civil, instalado en Amecameca, a la que asisten los alcaldes de los municipios de Amecameca, Atlautla, Ecatzingo, Ozumba, Tepetlixpa y Ayapango y los representantes de las Instituciones participantes en el Plan Operativo Popocatépetl, con el objetivo de preparar la evacuación de las poblaciones situadas en zonas de alto riesgo.
- 02:00 horas, el Director General de Protección Civil informa que el Centro Nacional de Prevención de Desastres recomienda la evacuación de las poblaciones de San Pedro Nexapa y San Juan Grande, del Municipio de Amecameca, San Juan Tehuixtitlan perteneciente a Atlautla Ecatzingo y sus Delegaciones de San Juan Tlacotompa, Tecomaxusco y la población asentada en la zona de cañadas de los Municipios de Atlautla, Ozumba y Tepetlixpa. En la reunión se acuerda que a las 06:00 horas se inicie la evacuación con una orden simultánea. Para el transporte se utilizará un convoy de ferrocarril de Amecameca a Chalco con 36 vagones proporcionado por Ferrocarriles Nacionales a través de la Dirección General del Centro SCT-México.
- 06:00 horas, comienza la evacuación de las poblaciones designadas.
- 07:30 horas, el informe emitido por el CENAPRED indica una drástica disminución de la actividad volcánica, se producen pequeñas exhalaciones y cortos periodos de tremor armónico. El Semáforo de Alerta Volcánica permanece en Amarillo fase III y se amplía el radio de exclusión a 10 km, cerrando la circulación en el Paso Cortés, al norte del volcán Popocatépetl.
- 10:00 horas, el CENAPRED emite un comunicado en el que indica que no es necesario evacuar la población del Municipio de Ecatzingo y sus Delegaciones.
- 11:00 horas, el CENAPRED emite un comunicado para que retorne la población San Pedro Nexapa y la situada en las cañadas del volcán.
- 11:20 horas, se realizan reuniones para informar a la población y llevar a cabo las acciones de retorno en San Pedro Nexapa, San Juan Tehuixtitlán, Tecomaxusco, Ecatzingo y Tlacotompa. Se indica a la población que la actividad del Volcán Popocatépetl ha disminuido. Pese a todo, los transportes destinados para la evacuación se mantienen situados en los núcleos principales de los municipios.
- 16:30 horas, el CENAPRED emite un comunicado sobre el estado del volcán, indicando que en las últimas 4 horas continúa registrándose un bajo nivel de actividad: 6 exhalaciones moderadas sin ceniza, con la presencia de tremor de alta frecuencia cuya amplitud aumenta gradualmente.

- 22:30 horas, el CENAPRED confirma la tendencia del incremento de energía y la posibilidad de que se produzcan explosiones iguales o mayores a las registradas en los últimos días.
- **17/12/2009.**
 - 07:00 horas, el CENAPRED indica que continúa el incremento de la actividad del volcánica. A las 02:33 horas, terminó la señal de tremor armónico y a las 02:35 horas, se produce una explosión moderada con material de proyección aérea, que alcanza un 1 km de distancia desde el centro de emisión. A las 6:47 horas, se registra una exhalación que produce una fuerte emisión de ceniza con dirección inicial Suroeste y que persiste en el momento de emitir este informe. Permanece el radio de seguridad del volcán en 10 km y el Semáforo de Alerta en nivel Amarillo III. La Dirección General de Seguridad Pública y Tránsito del Estado de México, solicita autorización para retirar los vehículos de transporte estacionados en San Pedro Nexapa. La población se encontraba molesta por su presencia al considerarlos innecesarios. Los vehículos fueron llevados al Centro de Operaciones de Protección Civil en Amecameca.
 - 13:00 horas, el CENAPRED informa que a las 08:16 horas, se produjo una exhalación moderada con una emisión de ceniza que alcanzó una altura de 2.5 km con dirección inicial al suroeste. A las 09:45 horas, se observa una disminución de los niveles de actividad, con exhalaciones esporádicas con emisión de ceniza y vapor de agua. A partir de las 9:45 horas, hubo una disminución en los niveles de actividad con episodios de tremor de alta frecuencia intermitentes y exhalaciones esporádicas con emisiones de ceniza y vapor de agua. Se informó de caída de ceniza en algunas poblaciones del sector Oeste del volcán. Permanece el radio de seguridad del volcán de 10 km, el Semáforo de Alerta Volcánica en nivel Amarillo III y no se descarta que en las próximas horas se incremente la actividad del volcán. El Servicio Meteorológico Nacional proporciona el pronóstico de los vientos para las próximas horas, dirección Sureste a 5000 metros, Sureste a 7000 metros y Este a 9200.
 - 17:00 horas, el CENAPRED informa a las 15:13 horas, de una exhalación moderada y a las 15:30 horas, un aumento en la amplitud del tremor de alta frecuencia con una emisión continua de ceniza que alcanza una columna de 3 km. A las 17:13 horas, la amplitud de tremor de alta frecuencia baja. El Centro de Operaciones recibe informes de caída de cenizas en Amecameca, Huehuecalco, San Pedro Nexapa, Ecatzingo, Ozumba, Tecomaxusco, Tepecoculco y Tepetlixpa. Permanece el radio de exclusión de 10 km del volcán y el Semáforo de Alerta Volcánica en Nivel Amarillo III.
- **18/12/2002.**
 - 01:30 horas, el CENAPRED informa que en las últimas horas la actividad del volcán Popocatepetl se mantiene estable. A las 23:45 horas, se registran episodios

- de tremor de alta frecuencia con pequeñas emisiones de ceniza. A partir de las 00:45 horas, se observa incandescencia en el cráter.
- 06:35 horas, la actividad del volcán se mantiene estable, se observaba una señal de tremor de alta frecuencia y baja amplitud, con episodios de tremor armónico y exhalaciones de baja intensidad. En el momento de realizar este informe se aprecia una escasa columna de ceniza y vapor de agua que se eleva 1500 metros sobre el cráter.
 - 11:15 horas, en las últimas 24 horas disminuye la actividad sísmica del volcán Popocatepetl, se registraron 10 exhalaciones y 3 episodios de tremor armónico de corta duración. Desde el día anterior se observa una fumarola continua en la parte central del cráter.
 - 13:00 horas, el Secretario General de Gobierno del Estado de México preside una reunión en el Municipio de Atlautla con los integrantes del Plan Operativo Volcán Popocatepetl, para conocer la capacidad de respuesta de cada Dependencia y los recursos disponibles en caso de emergencia.
 - 17:00 horas, El CENAPRED informa que en las últimas 6 horas el volcán continúa con una actividad sísmica baja y exhalaciones esporádicas. La Dirección General de Carreteras Federales de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, realiza un vuelo para verificar el estado del cráter; se observa un crecimiento del domo. Permanece el radio de exclusión del volcán en 10 km y el Semáforo de Alerta Volcánica en Amarillo Nivel III.
 - 17:25 horas, comienza un tremor armónico similar a los detectados anteriormente. A las 17:51 horas, se produce una exhalación con emisión de ceniza que alcanza una altura de 1500 metros por encima del cráter. A las 18:36 horas, se observa incandescencia en el interior del cráter y a las 19:13 horas, ocurren explosiones moderadas con proyección balística de material de 500 a 1000 metros de distancia y una columna de ceniza que asciende a 4000 metros. Esta nueva actividad vuelve a reactivar el Plan de Emergencia y pone en alerta a todos los cuerpos que lo integran.
 - 19:41 horas, la difusión de la nube de ceniza alcanza los 15 kilómetros y la emisión de material de proyección aérea alcanza valores máximos a las 19:25, 19:35; 19:40 y 19:43 horas. A las 19:57 horas, desciende el nivel de actividad. Se reciben informes de caída de ceniza en San Pedro Benito Juárez, en Atlixco y San Jerónimo.
 - 22:00 horas, el Gobernador del Estado de México llega al Municipio de Amecameca tras realizar una visita a la población de San Pedro Nexapa, donde la comunidad le solicita ser evacuada. El Gobernador informa a la población que se harán los preparativos necesarios para la evacuación. Se lleva a cabo una sesión del Consejo Estatal de Protección Civil en la Presidencia Municipal de Amecameca,

donde el Gobernador da las instrucciones precisas para iniciar la evacuación de las comunidades en riesgo, empezando por San Pedro Nexapa.

● **19/12/2000**

- 01:30 horas, se inicia la movilización de las poblaciones de San Pedro Nexapa, San Juan Tehuixtitlán, San Juan Grande, Colonia Alzate, Colonia Industrial, Tecalco, San Juan Tlacotompa, San Vicente Chimalhuacán, San Marcos Tecomaxusco, Atlautla, San Diego Huehucalco y Ecatingo. Las autoridades de los Ayuntamientos de Amecameca, Atlautla, Ozumba, Ecatingo y Tepetlixpa, en coordinación con el Grupo de Acción de Respuesta Inmediata Popocatepetl (GARIP), de la Dirección General de Seguridad Pública y Tránsito, organizan a la población para abordar los vehículos y realizar la evacuación. El control de operación de los vehículos utilizados estuvo a cargo de la Dirección General de Transporte Terrestre de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes del Estado de México. La Dirección General de Seguridad Pública y Tránsito participa con 800 personas y 120 unidades y la Policía Federal Preventiva con 10 personas y 5 patrullas destinadas al control del tráfico de la carretera federal 115 en la que se desvía el tráfico de vehículos pesados por rutas alternativas; los puntos de control de tráfico se ubican en Cedral, Amecameca, Ayapango, Tenango del Aire y Nepantla. Cada convoy de vehículos fue acompañado por una patrulla de la Dirección General de Seguridad Pública y Tránsito con el fin de garantizar la llegada a los refugios temporales.

Tabla 20: Vehículos disponibles para la evacuación del día 19/12/2000

MUNICIPIO	COMUNIDAD	AUTOBUSES	MICROS	COMBIS	SEDAN
Amecameca	San Pedro Nexapa	30	8	126	20
	San Juan Grande	5	3	40	8
Atlautla	Tepecoculco	-	-	50	20
	San Juan Tehuixtitlán	6	-	45	15
Ozumba	S. Mamalhuazuca	5	-	35	15
	Col. Alzate	-	10	20	30
	Col. Industrial	-			
	Chimalhuacán	32			
Tepetlixpa	Nepantla	5	20		
	Santa Rosa		30		
Ecatingo	Tlacotompa	15	-	-	20
	Texomaxusco	27	3	47	
Subtotal		125	74	363	128
Total de Unidades		690			

- Según el censo, de un total de 27047 personas, fueron evacuadas 15687, es decir el 58%, de las cuales sólo 8592 se alojaron en los refugios temporales y el resto en casas de amigos o parientes.

- 02:08 horas, el CENAPRED informa de nuevas explosiones con material de proyección aérea hacia la zona oeste a una distancia de 500 metros. Se observa una columna que se eleva a más de 3 km de altura con dirección Sureste.
- 06:11 horas, el CENAPRED informa del inicio de otra etapa explosiva con emisión de material de proyección aérea hacia el flanco Este del volcán, alcanzando distancias de 1 kilómetro. A las 09:19 horas, se detectan episodios de tremor armónico continuo con amplitudes importantes. Permanece el radio de exclusión en 10 kilómetros y el Semáforo de Alerta Volcánica en Amarillo Fase III.

Tabla 21.: Relación de poblaciones y número de personas evacuadas el 19 de diciembre de 2000, según datos de la Protección Civil del Estado de México.

Nº1	Localidad	Pob. Total	Pob. No Evacuada %		Pob. Evacuada	
				%		%
1	S. Pedro Nexapa	3317	700	21	2620	79
2	S. Juan Tehuixtitlan	5428	3256	60	2171	40
3	S. Juan Grande	212	26	12	187	88
4	Colonias Industrial y Alzate	1600	640	40	960	60
5	S. Vicente Chimalhuacan	3894	2336	60	1558	40
6	Sta. Rosa	846	507	60	338	40
7	S. Miguel Nepantla	1000	600	60	400	40
8	S. Marcos Tecomaxusco	840	252	30	588	70
9	Ecatzingo de Hidalgo	9038	2711	30	6327	70
10	S. Juan Tlacotompa	872	348	40	523	60
Total		27047	11379	42	15672	58

- Los vecinos de las comunidades de San Pedro Nexapa, San Juan Grande y San Juan Tehuixtitlán organizan grupos, a cargo de los Delegados Municipales, para alimentar a los animales y realizar labores de vigilancia en las áreas desocupadas. Paralelamente se establecen dispositivos de vigilancia con personal de la 37 Zona Militar, Dirección General de Seguridad Pública y Tránsito, Policía Federal Preventiva y Cuerpos de Seguridad Pública Municipales. La Procuraduría General de Justicia, a través de la Subprocuraduría Regional de Justicia de Amecameca, designa Agentes del Ministerio Público, Policía Institucional y de Servicios Periciales para atender a la población. Destacar que durante las acciones de evacuación y los 13 días siguientes no se registró ninguna denuncia por actos ilícitos.

Tabla 22.: Distribución y evolución del número de evacuados en los albergues durante los días que duró la evacuación (Protección Civil Estado de México)

Nº	Albergue	Día 18	Día 19	Día 20	Día 21	Día 22	Día 23	Día 24	Día 25	Día 26
1	Esc. P. Luis G. Urbina	304	546	546	457	419	362	309	319	350
2	Auditorio Municipal	637	815	825	594	594	631	637	637	555
3	Esc. Normal N°5	176	220	220	220	220	220	230	203	203
4	Esc. S. Manuel Hinojosa	265	176	176	262	262	262	262	262	261
5	Preparatoria anexa a la Normal	169	290	290	266	266	266	230	203	224
6	Esc. P. Gustavo Baz	319	320	320	246	246	246	319	400	376
7	Esc. Prep. N° 30	355	497	497	433	433	433	390	390	293
8	Esc. Sec. N° 110 Luis G. Urbina	272	253	253	265	265	265	272	272	272
9	Esc. P. Sor Juana Inés de la Cruz	230	238	238	219	219	219	256	224	224
10	Auditorio Ejidal Ayotzingo	109	347	347	326	324	324	109	326	0
11	Auditorio Ejidal Tlapala	211	406	406	376	376	376	196	376	0
12	Auditorio Ejidal S. Marcos Huixtoco	240	400	398	398	398	373	211	211	211
13	Club de Leones	250	613	613	552	552	520	299	299	299
14	Esc. P. Ignacio Manuel Altamirano	141	546	546	468	468	299	171	171	171
15	Esc. S. Tec. N°119 Juan Rulfo	237	214	214	236	236	236	237	237	237
16	Esc. Tec. Valle de Chalco	-	293	293	293	293	293	293	293	0
17	C.D.C. Juan Diego	230	497	497	399	399	380	303	303	285
18	Iglesia de los Santos	-	519	519	519	519	519	519	0	0
19	Ayapango	-	0	172	173	173	172	172	0	0
20	Nezahualcoyotl	-	0	800	310	310	800	800	184	184
21	Tenango del aire	-	21	192	192	192	192	192	21	21
22	Juchitepec	-	0	162	162	162	162	162	0	0
23	Cocotitlan	-	57	68	65	65	68	68	57	57
24	Chalco	-	0	0	302	302	0	253	0	0
25	Ozumba	-	0	0	25	25	0	0	0	0
Total		4170	7268	8592	7758	7718	7618	6890	5388	4223

- Para atender a la población evacuada se preparan 18 refugios temporales, 15 en Chalco y 3 en Valle de Chalco, en donde se atiende a 7198 personas. Se atiende a 800 personas más en 2 refugios temporales localizados en el Municipio de Nezahualcóyotl. En los municipios de Cocotitlán, Tenango del Aire, Juchitepec y Ayapango están albergadas 594 personas. En total, la población atendida en refugios asciende a 8592 personas. El Ejército Mexicano instala 500 literas, 1000 colchones, 1000 colchonetas y 16 cocinas, además de los proporcionados por las dependencias del Gobierno del Estado. La Secretaría de Desarrollo Económico, a través de la Dirección General de Abasto y Comercio proporciona 630 toneladas de alimentos, cobertores, mantas, colchonetas y diversos productos para el aseo.
- 15:00 horas, el tremor armónico se registra desde hace 5 horas y 20 minutos en todas las estaciones de la Red Sísmica de monitoreo del volcán. La columna de ceniza se mantiene con una altura de 2.5 a 3 kilómetros, afectada por vientos con dirección sur. Es posible observar la nube de ceniza en diferentes puntos del país.
- El Sector Salud habilita consultorios médicos en cada refugios temporal para dar atención médica inmediata a los evacuados, la 37 Zona Militar designa un médico militar en cada refugio y fija su almacén de medicamentos. La Dirección General de Regulación Sanitaria de la Secretaría de Salud del Estado, mantiene una vigilancia constante de la calidad del agua y alimentos para evitar enfermedades gastrointestinales entre los evacuados. La Comisión del Agua del Estado de México analiza y monitorea de forma permanentemente las fuentes de abastecimiento; manantiales producto del deshielo, pozos profundos y el agua potable de los refugios temporales. Se utilizan 18 unidades para el suministro de agua potable de 16 centros en Chalco y 2 en Valle de Chalco Solidaridad. El laboratorio encargado de los análisis, en función de los datos obtenidos de las muestras de agua provenientes del Sistema Sureste y de las cisternas, junto al monitoreo de cloro residual, concluye que el agua es apta para el consumo humano y cumple con la norma oficial mexicana NOM-127-SSA1-1994; se efectúan 188 mediciones de cloro residual, se supervisaron 264 cisternas, se realizan 178 análisis de muestras de deshielo. La Comisión Nacional del Agua entrega a los evacuados 25200 litros de agua embotellada y el Gobierno del Estado envía *vehículos cisterna* con agua potable para el abastecimiento de los depósitos de los refugios temporales. Se instalan letrinas provisionales en los refugios temporales y se activa el servicio de aseo en baños públicos.
- 16:30 horas, el CENAPRED reporta una disminución en la amplitud del tremor. La emisión de ceniza es constante y la nube resultante se ve afectada por vientos con dirección este y, a mayores distancias, sur. La zona de exclusión se mantiene a 10 km, el Semáforo de Alerta Volcánica permanece en Amarillo Fase III y continúa el estado de alerta máxima.

Hasta este punto se detallan los cinco primeros días de la evacuación que se llevó a cabo en el año 2000 como consecuencia del incremento de la actividad volcánica del volcán

Popocatépetl. El retorno de las personas evacuadas se produjo el día 27 de diciembre de 2000 por recomendación del Comité Científico, aunque se mantuvo la alerta y se aconsejó a las personas que permanecieran atentas a los medios de comunicación para seguir los partes sobre la situación del volcán. Como puede observarse, a lo largo de la secuencia cronológica, el proceso de evacuación no siguió una pauta definida, tuvo distintas fases, e incluso se retornó a la población evacuada el día 16. La evacuación principal comenzó el día 19 a la 01:30 horas, pero en el informe no se especifica el *tiempo de evacuación*, aunque por la duración de la operación de *Regreso a Casa* y la secuencia general de los hechos, podemos establecer un intervalo temporal que va de 5 a 6 horas.



Figura 132: Aspecto del volcán Popocatépetl al amanecer del 19/12/2000 (Foto, cámara de vigilancia del CENAPRED).

El número total de personas evacuadas el día 19 fue de 15671 y aunque sólo se albergaron en los refugios temporales 8592, no se especifica si todas ellas utilizaron los transportes colectivos proporcionados por Protección Civil o las que se dirigieron a casas de familiares lo hicieron por sus propios medios. En cualquier caso, en el escenario desarrollado para reproducir la evacuación llevada a cabo el día 19, se ha considerado la población total indicada, asumiendo como punto de destino general un punto intermedio entre Chalco y Valle de Chalco.

Para reproducir la evacuación del año 2000 en el Estado de México se han establecido los siguientes parámetros:

Tabla 23: Tipologías, parámetros y datos generales de las simulaciones aplicadas a las localidades situadas en el entorno del volcán Popocatepetl, en el Estado de México.

Tipo vía	V. km/h	Capacidad	Características		
Vía Férrea	30	100	Doble sentido, dos carriles en cada dirección.		
Autovía	80	8-16-100	Doble sentido, 1 carril en cada sentido.		
Carretera	70	4-8-100	Doble sentido, 1 carril en cada sentido.		
Terracería	30	4-8-100	Doble sentido, 1 carril en cada sentido. Pista de tierra.		
Parámetros					
Discretizados Temporal y espacial			Coordenadas del área de análisis		
Discretizado espacial (dx)	100 m.	Xmin	499341.9	Ymin	2086993.1
Discretizado temporal (dt)	1 seg.	Xmax	530111.7	Ymax	2135813.5
Modelo C. población 15 min		Modelo C. población 1.30 h		Modelo C. población 4 h	
Valor Medio (T1)	1000.0 seg	Valor Medio (T1)	5400.0 seg	Valor Medio (T1)	14400.0 seg
Dispersión (S1)	383.02	Dispersión (S1)	3179.65	Dispersión (S1)	4444.72
Fracc. Pobl (R1)	40%	Fracc. Pobl (R1)	0%	Fracc. Pobl.	60%
En las simulaciones solo se ha tomado una función monolobulada de 1.30 horas.					
Modelo de Velocidad					
Constante D.V c2	4	Constante D.V. c1	700		
Porcentaje ocupación (p1)	10%	Constante D.V c2	4		
Porcentaje ocupación (p2)	60%				
Datos generales y observaciones					
Población total a evacuar:	15672	Según datos de la Protección Civil del Estado de México para la evacuación realizada en diciembre de 2000			
Nº total de puntos utilizados:	5672	La red viaria representa 283.6 km. En nivel de detalle alcanzado equivale aproximadamente a una escala de 1:50000.			
Distribución zonal 1	Solo existe una distribución zonal compuesta por tres zonas.				
En la simulación no se ha tenido en cuenta la dirección de las vías de comunicación, se asume que todas permiten circular en ambas direcciones.					
Se ha utilizado un único punto de destino al desconocer el refugio temporal donde se alojó cada una de las poblaciones evacuadas. Por tanto, al evaluar el tiempo de evacuación, habrá que tener en cuenta que falta este recorrido final.					
En las simulaciones se han utilizados valores de capacidad altos (100) para evitar retenciones y bajos para contrastar el tiempo de evacuación.					
El escenario planteado ha sido simulado aplicando la misma función de comportamiento de la población					
Escenarios definidos					

1. Evacuación organizada con población preparada. Se opera en simultáneo, con una única función de comportamiento de la población: normal de 1.30. Se reducen las velocidades, simulando las alcanzadas por el transporte colectivo y se varía la capacidad de las vías; alta y baja. La zona lleva en alerta 4 días, con los medios y recursos en espera de realizar la evacuación. La población está a la espera de ser evacuada. Los destinos principales son Chalco y Valle de Chalco.

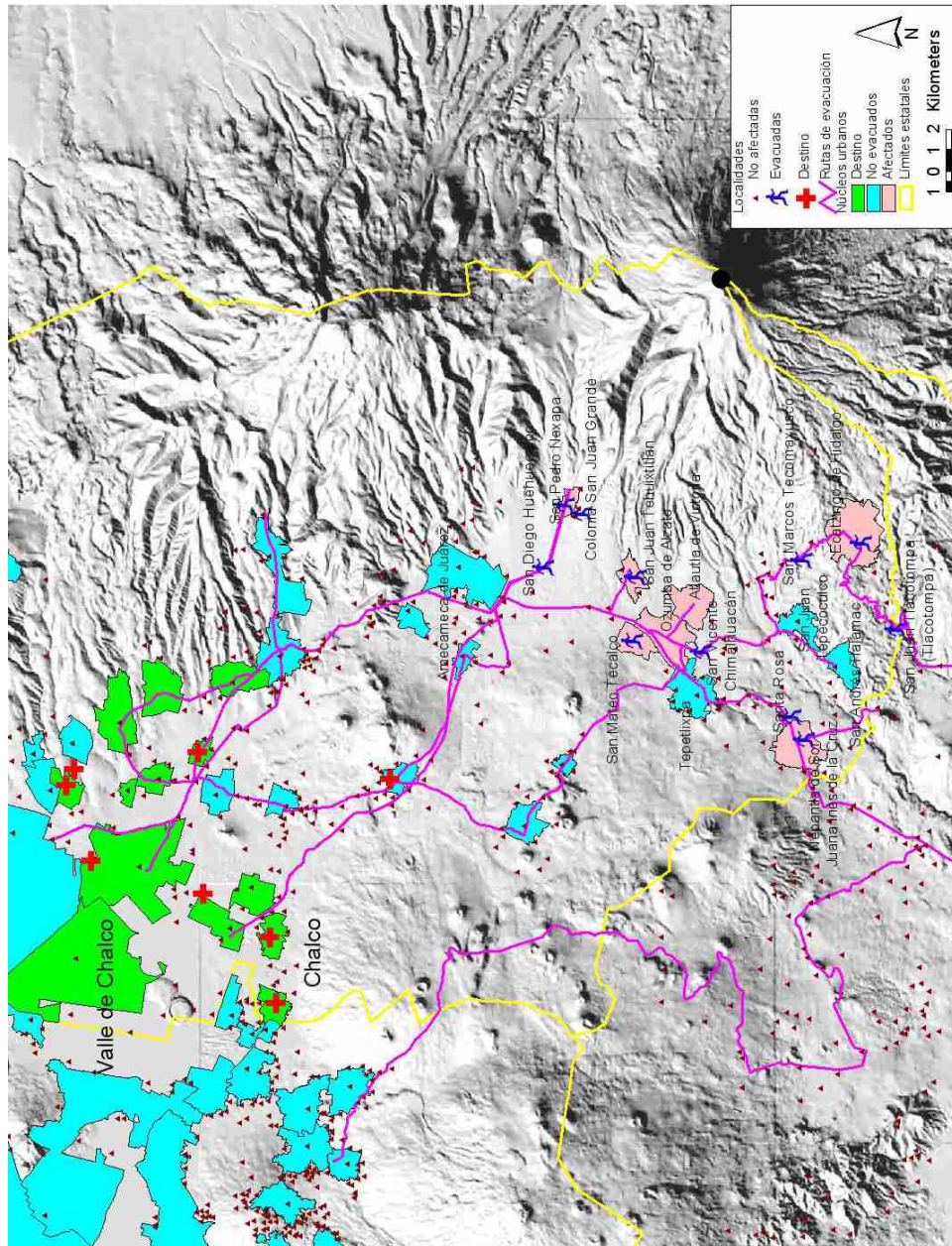


Figura 133: Zona evacuada y puntos de destino de la evacuación del 19 de diciembre de 2000

5.8 Modelización

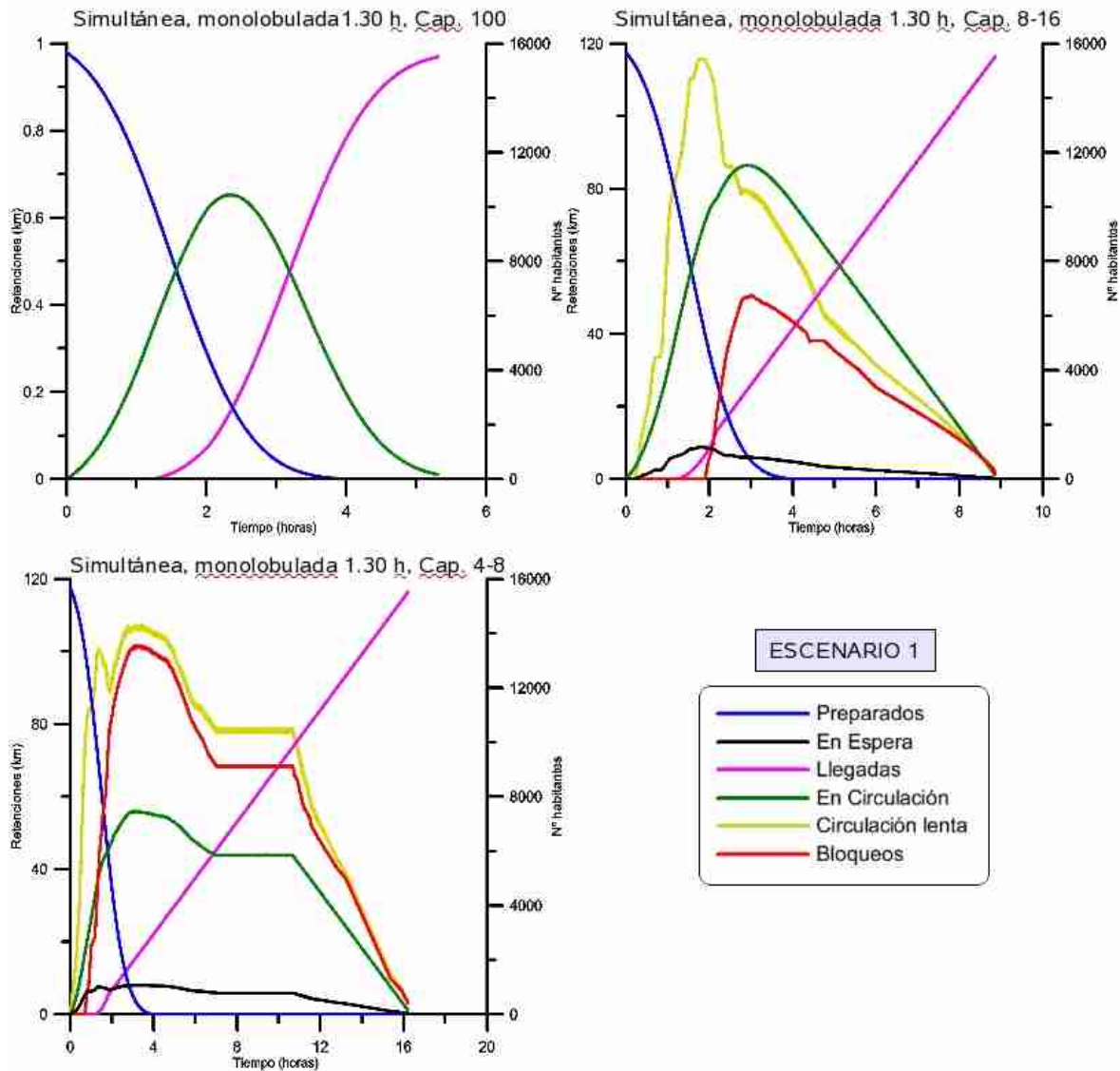


Figura 134: Se he realizado tres simulaciones variado únicamente el valor de capacidad de las vías de comunicación para evaluar los parámetros que más se aproximan a la situación del 19 de diciembre de 2000.

5.9 Resultados obtenidos

El tiempo de evacuación, para la evacuación llevada a cabo el 19 de diciembre de 2000 a la 01:30 horas, se ha fijado entre 5 y 6 horas según la documentación proporcionada por la Protección Civil del Estado de México. La primera simulación, en la que se asignan valores altos de capacidad (100) a las vías de comunicación, es la que más se aproxima a la situación

planteada con 5.31 horas. Esta simulación depende únicamente del tiempo de preparación, la velocidad de las vías de comunicación y la distancia a recorrer.

En las simulaciones en las que se reduce la capacidad de las vías de comunicación, el tiempo de evacuación obtenido es de 16.20 horas (para capacidades de 4 y 8) y 8.85 horas (para capacidades de 8-16). La variación en el valor de la capacidad se ha realizado siguiendo un criterio potencial para observar el contraste en los resultados obtenidos.

CAPITULO 6

Recomendaciones

6 Recomendaciones

La gestión de una crisis volcánica es un problema muy complejo, en el que intervienen cuatro actores:

- Equipo Científico – Técnico
- Protección Civil y Cuerpos de Seguridad y Emergencia
- Dirección Política
- Población vulnerable

que suele afectar a miles de personas, pues diversos motivos hacen, generalmente, que las áreas volcánicas estén densamente pobladas.

Cuando el volcán presenta signos de mayor actividad, el equipo científico intensifica la labor de monitoreo encaminada a establecer el diagnóstico de la condición del volcán y el pronóstico de una posible erupción. El tiempo para poder dar una alerta, con un mínimo de garantía, es de pocos días antes del impacto esperado. Esta información sobre una posible erupción y sus efectos, con las recomendaciones oportunas, es transmitida al estamento político, el cual, si lo considera oportuno, ordenará a Protección Civil la gestión de la emergencia y comunicará a la población las acciones a realizar.

Para el seguimiento de la crisis es necesario la aplicación de metodologías y herramientas disponibles hoy en día que requieren una serie de datos que deben estar disponibles con la mayor calidad posible. Estos datos necesitan, habitualmente, un número de horas de trabajo previo importante para tenerlos en las condiciones requeridas para su utilización efectiva, mas aun, si se requiere trabajo de campo para recopilarlos. En una situación de crisis, la ausencia de estos datos puede retrasar considerablemente la obtención de resultados e incluso podría llegar a descartarse el uso de alguna herramienta. Por este motivo, se ha incluido este capítulo en el que se recogen una serie de recomendaciones sobre cómo deben estar disponibles los datos, tanto para el uso de la aplicación desarrollada en este trabajo, como para otro tipo de herramientas software necesarias para la gestión de la crisis volcánica.

6.1 Objetivos de diseño, obtención y uso de datos estadísticos

Entre los problemas encontrados, uno de los más relevantes es la ideología que subyace en el proceso de diseño, obtención y uso al que están destinados los datos que las Administraciones locales obtienen de la población, que es exclusivamente la identificación y recaudación de impuestos de las personas residentes en el ámbito administrativo. Por tanto, esta ideología subyacente, no tiene en cuenta otros usos posibles para la información recabada. Los datos relacionados con la gestión y mitigación de los riesgos naturales o antrópicos se consideran algo específico y particular, ajeno a la gestión diaria de la Administración y se

obtienen mediante campañas puntuales, muchas veces impulsadas por otros organismos o centros de investigación. Esta situación hace que la información quede rápidamente obsoleta al no estar incluida en el proceso de gestión diaria de las Administraciones locales.

Como recomendación se propone incluir, dentro de los censos y padrón de habitantes, datos que ayuden en el proceso de gestión de cualquier tipo de crisis, natural o antrópica. Por ejemplo, personas con algún grado de deficiencia psíquica o física que, en caso de una evacuación, necesitarán personal cualificado y otros medios para conducirlos desde su domicilio hasta el vehículo de transporte. Se trata de desarrollar un apartado específico que contemple toda aquella información que pueda resultar útil en la gestión de una crisis a los cuerpos de Protección Civil para desarrollar su labor de forma más efectiva y, sobre todo, conocer de antemano los recursos que necesitarán para ello. Este proceso requiere una toma de conciencia por parte del ciudadano, que debe conocer la importancia que tienen los datos que proporciona a la Administración pública para su seguridad ante crisis provocadas por fenómenos naturales o antrópicos.

Con el cumplimiento de esta recomendación se garantiza:

- El proceso de actualización de los datos útiles para la gestión y mitigación del riesgo, al quedar incluidos en la gestión diaria y procedimientos rutinarios de encuestas.
- La mejora de la calidad de la información contenida en las bases de datos administrativas, al abrir una nueva perspectiva sobre la forma en la que los ciudadanos entienden el uso al que está destinada la información que proporcionan a la Administración.

6.2 Georreferenciación de la población

Cada población, a lo largo de su Historia, ha desarrollado formas distintas para localizar un lugar en su zona de hábitat. En líneas generales, se ha mantenido un patrón similar en la mayoría de los grupos sociales, especialmente los ubicados en zonas urbanizadas. Para poder georreferenciar información y asociar datos a un elemento espacial, es importante tener sistematizados los criterios de localización utilizados y aplicarlos por igual a la cartografía digital disponible y a las bases de datos administrativas. Para los estudios de detalle, en entornos urbanos, los elementos principales son la vía de comunicación y la edificación.

El objetivo es disponer, en campos independientes de la base de datos, de cada uno de los elementos que constituyen el apartado *dirección* (calle, número, piso, puerta, localidad, etc.). Esta misma información debe estar integrada en la cartografía y según el grado de detalle con que se haga, se podrá trabajar a una escala u otra. Esto permite, no solo una distribución espacial de la población lo más fidedigna posible, sino también trabajar otros aspectos, entre ellos la vulnerabilidad de las edificaciones y vías.

El máximo nivel de detalle que ofrece la Administración pública para los datos estadísticos, suele ser a nivel de núcleo de población, que está en un punto intermedio entre el municipio y la dirección de un individuo. La división espacial de los núcleos de población es mucho más dinámica que la municipal, aspecto que influye en la secuenciación temporal de los datos.

Igualmente, la digitalización de los límites administrativos resulta bastante controvertida y la mayoría de las veces no están suficientemente claros o están a la espera de resoluciones judiciales. Por ello, al menos en Canarias, es habitual encontrar datos estadísticos sin información que permita georreferenciarlos. Se sabe que pertenecen a un municipio, pero no al lugar. Sería muy importante añadirles como norma las coordenadas, con el objetivo de facilitar su integración en un Sistema de Información Geográfica, lo que facilitaría, a falta de información más detallada, la georreferenciación inmediata de la población, más allá de la escala municipal.

6.3 Controlar administrativamente la totalidad de la red de comunicaciones

Es importante que los municipios tengan registradas todas las vías de comunicación, públicas o privadas que existan en su territorio y no, únicamente, las principales. Esto facilita la integración de determinadas edificaciones en el callejero oficial, factor importante cuando en el entorno predomina el caserío disperso. Asimismo, a nivel de gestión del riesgo, cualquier vía de comunicación es siempre crucial para acceder a los puntos donde se produce la emergencia. Si tenemos en cuenta la vulnerabilidad de la red de comunicaciones, estas vías secundarias pueden convertirse en rutas alternativas para evacuar a la población, en caso de producirse un corte en la principal.

Otra cuestión, desde el punto de vista de la digitalización vectorial de la vía de comunicación es que, a veces, no se entiende bien el concepto de individualidad de un elemento espacial. Una vía de comunicación es una línea espacial que tiene un principio y un final y así debe ser tenida en cuenta cuando se la cataloga. No puede dividirse o nombrar de forma distinta el lado derecho y el izquierdo, la vía es única. Si se tuviera en cuenta este concepto se simplificarían notablemente muchos de los problemas que presentan los callejeros oficiales actuales. También hay que realizar un esfuerzo por evitar la duplicidad de vías de comunicación con el mismo nombre.

6.4 Control espacial – control de la población

Debido a los problemas encontrados en los padrones municipales y, en general, en los censos de población, puede resultar más efectivo, desde el punto de vista de la información necesaria para atender una emergencia, conocer cuantas viviendas hay en una zona que debe ser evacuada que fiarse del número de habitantes que pueda aparecer en los censos realizados. Dada la movilidad de la población hoy en día, resulta complicado conocer el número exacto de personas que hay en un momento dado en una zona concreta, sin embargo, a partir del censo de viviendas y las características socio-económicas de la población, podría estimarse la cantidad máxima de habitantes residentes en ese área. Este control espacial de viviendas se ejercería a partir de la digitalización y caracterización de las edificaciones, incluyendo los factores de vulnerabilidad, al ser elementos más estables en el tiempo. Esta estrategia está pensada especialmente para pequeñas y medianas poblaciones que se localizan próximas a las zonas de riesgo de los volcanes en las que se debe trabajar a escala de detalle.

6.5 El sistema de referencia de la cartografía

El primer ámbito para este trabajo ha sido Tenerife, una isla relativamente pequeña donde toda la cartografía utilizada está en el mismo sistema de coordenadas; ITRF93, elipsoide WGS84 con el marco geodésico de referencia REGCAN95 y cuyo sistema de representación plana oficial es en Universal Transversa de Mercator (UTM), donde todas las coordenadas UTM pertenecen al Huso 28 (Cartografía de Canarias, S.A.).

En el caso de México la situación ha sido más compleja ya que posee cuatro *datums* distintos: NAD27, WGS84, ITRF92 y NAD83. Según la institución que genere la cartografía, la zona para la que se haga y la época en la que fue realizada, nos encontramos con cartografías que son imposibles de combinar si no se realiza un proceso de reproyección. Para un técnico que no esté familiarizado con este tipo de procesos o que no disponga del software adecuado, puede resultar bastante complicado implementar el SIG.

En estos casos, lo ideal es tener las diversas capas cartográficas proyectadas en todos los sistemas vigentes, al menos en los principales, aunque ello implique triplicar la información. De esta forma se podrá trabajar en el sistema que se considere adecuado en cada momento, sin necesidad de perder tiempo en este procesado. También es importante disponer de herramientas que permitan la rápida conversión de un sistema a otro, perfectamente adaptadas a las características de la cartografía del lugar. Una de las aplicaciones utilizada en este trabajo es IRIS 4.0 (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) y se ha contado con la colaboración directa y personal del servicio del CENAPRED y UNICACH.

6.6 Criterios de elaboración cartográficos

Sigue siendo habitual realizar cartografías digitales con mentalidad CAD, o lo que es lo mismo, como dibujos en los que lo importante es la forma visual, no el contenido o su estructuración interna. Esto plantea graves problemas cuando se quiere utilizar esta cartografía, dentro de un Sistema de Información Geográfica, para otros usos distintos a los meramente representativos, y, su reelaboración, exige un gran esfuerzo en tiempo y recursos humanos, aspecto crítico si se está inmerso en una situación de gestión de crisis. Por tanto, si no se puede controlar el proceso de fabricación de la cartografía, dado que en muchos casos son empresas privadas contratadas por administraciones públicas, al menos, es importante tener presente que el producto cartográfico final puede que no reúna las condiciones adecuadas. En esos casos, es esencial que sea revisado por expertos y, si es necesario, se realicen las modificaciones oportunas para que quede operativa y con garantías.

No hay que dejarse deslumbrar nunca por las cartografías digitales de gran detalle. Como se ha demostrado en el caso de Icod de los Vinos, Tenerife; al final se ha tenido que elaborar una cartografía propia a partir de la combinación de las existentes, pese a que hay una capa realizada a escala 1:1000.

6.7 Manejo de las cartografías digitales

En muchas regiones es habitual que los cuerpos de emergencia no manejen cartografías digitales, ni siquiera en una versión impresa, suelen disponer de mapas más antiguos. Las cartografías digitales quedan circunscritas a los Centros de Operaciones, Centros de Investigación, etc., donde únicamente son visualizadas por un escaso número de personas. Esta situación plantea varios problemas, especialmente cuando el impacto recibido del fenómeno natural o antrópico, sobrepasa la capacidad de los recursos locales o regionales y deben incorporarse personas, equipos u organizaciones de otras zonas del país, cuyo conocimiento del área es muy limitado, especialmente de la red de comunicaciones. Es muy importante que los cuerpos de emergencia manejen la misma cartografía en todos sus niveles, que debe ser la misma que utiliza el equipo científico para generar los escenarios de impacto esperado. De esta forma, los agentes implicados se acostumbran a reconocer su entorno y asociarlo rápidamente a los mapas disponibles, además pueden anotar información de campo muy valiosa que ayude a completar y mejorar la calidad de la cartografía digital. Todo este material, una vez elaborado, puede ser transmitido de la forma que se crea más conveniente, al personal foráneo que participe en la emergencia, aspecto que facilita la movilidad e independencia de este contingente en las tareas a desarrollar.

6.8 Conocer la zona de estudio

Dada las implicaciones que puede llegar a tener la planificación de una evacuación para el caso de una emergencia, es muy importante que los operadores que realizan las simulaciones, conozcan la red de comunicaciones y el área en general o cuenten con alguien que tenga estos conocimientos. La digitalización de la red de comunicaciones, sobre todo en las conexiones entre unas vías y otras es crítica y cualquier error puede hacer considerar, equivocadamente, como ruta de salida segura un viario que no lo es.

6.9 Problemas del cálculo de vulnerabilidades

Este tipo de estudios, calcular la vulnerabilidad de una estructura de propiedad privada, ante un evento natural o antrópico, puede presentar problemas legales si lo llevan a cabo las Administraciones públicas. Por este motivo, en países como Italia (Zuccaro et al., 2008), los datos obtenidos se mantienen en el ámbito académico. Esto implica la necesidad de mantener equipos permanentes de investigación que puedan obtener y actualizar los datos e integrarse, cuando se les necesite, en las estructuras de gestión de crisis.

También hay que señalar que los estudios de vulnerabilidad, suelen aplicarse únicamente a edificaciones o estructuras de ingeniería civil, dejando de lado obras menores como pueden ser los muros de piedra de contención de suelos agrícolas que, en muchos casos, su abandono puede generar un grave problema de interrupción de la vía, ante cualquier impacto de baja intensidad.

6.10 Recopilación de datos en las evacuaciones

Cuando se llevan a cabo evacuaciones, no es habitual tomar datos y, los pocos existentes, son difícilmente localizables pasado un tiempo, lo que dificulta un análisis posterior. Las situaciones derivadas de una evacuación, suelen ir acompañadas de un nivel de estrés importante para todos los implicados, por lo que es recomendable tener bien definido el protocolo de adquisición de datos sobre el desarrollo de la misma y, sobre todo, su correcta documentación y archivado para posibilitar un análisis posterior. Entre estos datos, además de los aspectos técnicos, es conveniente que se incluyan detalles de la operación y encuestas posteriores a la evacuación a técnicos y, especialmente, a la población evacuada.

6.11 Grado de incertidumbre en las evacuaciones

Cuanto mayor es el grado de desconocimiento respecto al área sobre la que se está trabajando, el operador deberá realizar numerosas simulaciones que contemplen el mayor número de casos posibles. Los tiempos de evacuación obtenidos deben tomarse siempre en términos relativos, nunca absolutos, fijando horquillas temporales para diversos supuestos o situaciones. El simulador no da solución a los problemas planteados en las evacuaciones, únicamente supone una ayuda para el diseño de las mismas, al igual que ocurre con los modelos que simulan diversos aspectos de la actividad volcánica, cuestión que debe tenerse siempre presente. No hay que olvidar en ningún momento a la población afectada, que es en última instancia la que decide si evacua o no. Hay cuatro elementos importantes que ayudan a mejorar los resultados obtenidos:

- Trabajo de campo para caracterizar minuciosamente la red viaria,
- Detección de las vulnerabilidades de las vías de comunicación.
- Reducir los factores sociales que fomentan la resistencia civil a la evacuación.
- Puesta en práctica de ejercicios y simulacros.

Todos estos elementos requieren mucho trabajo, tiempo y tienen un costo, por ello es necesario tener implementado este sistema de ayuda a la gestión de crisis volcánica, con anterioridad a que ocurra el posible impacto.

El *tiempo de reacción* de Protección Civil y el *tiempo de evacuación*, permiten establecer la *ventana temporal* necesaria que debe conocer el Comité Científico para establecer los pronósticos. Cuanto más corto sea este intervalo de tiempo, existe más posibilidad de acertar el pronóstico, pero se intensifica el riesgo. Comité Científico, Protección Civil y Dirección Política deben tener bien claro esta *ventana temporal* y ambos deben actuar ligeramente sobredimensionados.

6.12 Diseño de escenarios y mitigación del riesgo

Los escenarios de evacuación que se diseñan deben estar muy ligados al fenómeno natural o antrópico que pretenden mitigar ya que cada uno presenta un comportamiento específico. Si bien la toma de decisión, en muchos casos, puede conducir a una evacuación, la planificación

no tiene por qué ser la misma; para determinadas situaciones se establecen unas rutas de salida, mientras que en otros casos, esas mismas rutas pueden ser más vulnerables a un fenómeno que actúe con características distintas.

6.13 Sugerencia Final

Como ya se ha apuntado, los modelos y las simulaciones no proporcionan la solución inmediata al problema, sirven exclusivamente para obtener una visión general del mismo, poniendo de manifiesto donde se concentran los conflictos. La combinación de los distintos modelos que, en el caso de la crisis volcánica, son escenarios de impacto y evacuación, nos permite conocer el problema al que nos debemos enfrentar cuando el volcán alcance un nivel alto de actividad y presente una condición en la que el riesgo de una erupción, sobrepasa al riesgo de una evacuación. Los resultados obtenidos con la utilización de estas herramientas, permiten recomendar la realización de obras puntuales dirigidas a reducir el riesgo. Por ejemplo, el modelo de evacuación, aplicado a Icod de los Vinos, Tenerife, muestra la conflictividad de algunos puntos de la red viaria que coinciden con aquellos donde diariamente y a determinadas horas, el tráfico sufre interrupciones por la sobrecarga y configuración de la vía y cruces. Esta situación sería muy conflictiva en caso de una evacuación real, por lo que se recomienda a la Administración prestar atención a estos puntos y buscar soluciones, cuyo efecto sería el adecuado incremento en el nivel de aceptación del riesgo.

CAPITULO 7

Conclusiones

7 Conclusiones

En este trabajo se ha desarrollado una metodología para la gestión de una evacuación masiva en caso de emergencia volcánica. Incluye la definición y elaboración de las tablas de datos para su utilización en un Sistema de Información Geográfica a partir de los datos disponibles en la Administración Pública y el software para la simulación. La aplicabilidad del modelo se ha mostrado en tres casos de muy distinta índole. El primero estudia una evacuación total del municipio de Icod de los Vinos, (Tenerife, España). El segundo corresponde al entorno del volcán Chichón, (Chiapas, México) y en el tercero, volcán Popocatepetl (México), compara los resultados del modelo con la evacuación de más de quince mil personas realizada en el Estado de México en diciembre de 2000.

Se expone y discute el modelo de gestión actual de una crisis volcánica mostrando las herramientas desarrolladas a partir de los resultados de la Década para la Mitigación de los Desastres Naturales. Se hace un análisis de los medios disponibles para la gestión de crisis, poniendo de manifiesto la necesidad de disponer de un simulador de evacuaciones, compatible con los actuales generadores de escenarios eruptivos, que de soporte a la elaboración de los Planes de Emergencia Volcánica.

Se hace un análisis de la problemática de los modelos de evacuaciones masivas aplicados al caso de los huracanes, que por su recurrencia poseen abundante bibliografía, para extraer los principales elementos que los articulan y su posible aplicación en un modelo para erupciones volcánicas.

Se definen los elementos principales que condicionan el proceso de una evacuación: distribución y comportamiento de la población y caracterización de la red viaria. La escala de los datos disponibles condiciona el nivel de detalle de trabajo. Para la integración de todos estos datos en el Sistema de Información Geográfica se resuelve el problema de la cartografía, asociado a la escala, criterios de diseño inicial y sistema de proyección. La integración de la población en el Sistema de Información Geográfica ha exigido la adecuación de los datos oficiales para su asociación a la cartografía. Dependiendo de la escala, se ha trabajado a nivel de edificación o localidad. Se han preparado las utilidades, en el lenguaje de programación del Sistema de Información Geográfica, para crear la estructura de datos requerida por el simulador de evacuaciones. Se ha optado por un modelo de tipo vectorial, en vez de ráster, convirtiendo las vías de comunicación en puntos (X, Y) a los que se le asocia la población residente en sus proximidades.

Se ha desarrollado un programa en C++ para simular evacuaciones masivas para emergencias en crisis volcánicas. Se define un objeto *punto* cuyos atributos contienen toda la información exportada del Sistema de Información Geográfica más los campos necesarios para la simulación. Esta aplicación utiliza funciones de distribución para representar el comportamiento de la población y un ajuste lineal en tres tramos para la variación de la

velocidad en cada punto en función del nivel de ocupación. Para evitar que se produzcan fenómenos de *aliasing* espacial, de acuerdo con el Teorema del Muestreo, el discretizado temporal debe ser menor que el discretizado espacial dividido por la velocidad máxima considerada en la red de viaria. El modelo permite zonificar el área de trabajo y establecer prioridades de evacuación. Se pueden introducir eventos externos simulados mediante funciones aleatorias para representar situaciones de *pánico* o interrupciones de vías. Los resultados que proporciona el modelo corresponden a la evolución de las personas preparadas, en espera y circulando, junto a la información sobre retenciones.

En la aplicación a la evacuación del Municipio de Icod de los Vinos se ha utilizado una escala de detalle a nivel de edificación, eligiendo un discretizado espacial de 10 metros y temporal de 0,2 segundos. Se han evaluado dos escenarios correspondientes a autoevacuaciones improvisadas y organizadas definidas por el tiempo de preparación de la población, realizando 4 simulaciones para cada escenario en base a dos distribuciones zonales. Los tiempos de evacuación, para salir del municipio, varían entre 2 y 20 horas, con un tiempo medio del orden de 6 horas. Esta fuerte variación en los tiempos se debe elevado contraste entre escenarios. Este resultado refleja la necesidad de una correcta planificación de la evacuación y la importancia de la utilización de un simulador para esta labor.

En el volcán Chichón se ha tenido la ocasión de participar en un ejercicio de gestión de una crisis volcánica que incluye desde la reactivación del volcán hasta la realización de una evacuación real. Esto ha permitido evaluar el software de simulación para la generación de escenarios eruptivos y evacuación. En este caso se ha trabajado en un área extensa que incluye los puntos de destino final de los evacuados. El discretizado espacial es de 100 metros con discretizado temporal de 2 segundos y la distribución de la población se ha realizado a nivel de localidad. Se han considerado dos escenarios que corresponden a dos distribuciones zonales. Al considerar una evacuación dirigida, el tiempo de preparación ha sido el mismo para todas las simulaciones. Los tiempos de evacuación obtenidos oscilan entre 8 y 18 horas dependiendo del destino final elegido. Como referencia un vehículo, en condiciones normales de tráfico, tarda 5 horas en ir de Chapultanengo a Tuxtla Gutiérrez.

En el capítulo dedicado al volcán Popocatepetl, se analiza en detalle la problemática de una evacuación real gracias a los datos proporcionados por la Protección Civil del Estado de México. La simulación realizada corresponde a la llevada a cabo el día 19 de diciembre de 2000 a la 01:30 en la que se movilizaron más de quince mil personas. El tiempo de evacuación fue entre 5 y 6 horas.

Los ajustes de velocidad y capacidad son críticos para los resultados de las simulaciones. Para establecerlos se deben realizar numerosas simulaciones de ajuste hasta comprobar que los resultados obtenidos están dentro de los márgenes razonables.

La incorporación inmediata a la evacuación de un contingente elevado de población genera importantes retenciones. En las evacuaciones hay que evitar, en la medida de lo posible, las incorporaciones masivas en un corto espacio de tiempo, optando por un carácter más progresivo que evite o reduzca las retenciones, especialmente cuando se realiza una autoevacuación. Solo puede optarse por incorporaciones inmediatas cuando se dispone de

numerosos puntos de salida, hay una buena planificación previa y el tráfico puede dirigirse con las suficientes garantías.

Las evacuaciones secuenciales obtienen como beneficio un bajo índice de retenciones, pero incrementan el *tiempo de evacuación*. Son una opción en determinadas circunstancias, pero requieren una adecuada preparación y organización para que puedan llevarse a cabo con éxito. Difícilmente se podrán emplear sin haber realizado simulacros previamente.

En las evacuaciones simultáneas se obtienen valores más bajos en el *tiempo de evacuación*, pero alcanzan valores más altos en las retenciones. Este aspecto, incrementa el grado de incertidumbre y puede derivar en un aumento notable del tiempo de evacuación.

Finalmente, la aplicación de este modelo a tres áreas volcánicas con distinta problemática ha permitido establecer una serie de recomendaciones:

- Mejorar la calidad, procesos de actualización y gestión de los datos de población y cartográficos, destacando la necesidad de georreferenciar la información sobre la población
- Necesidad de disponer de datos sobre el comportamiento de la población en situación de emergencia.
- Importancia de la formación de los operadores para el manejo adecuado de las herramientas de simulación.
- Los resultados obtenidos mediante la simulación de evacuaciones ponen de manifiesto los puntos críticos de la red viaria, permitiendo recomendar a la administración la búsqueda de soluciones.
- El modelo muestra que el comportamiento de la población es crítico para minimizar el tiempo total de evacuación. Ello exige el desarrollo de un programa educativo y la realización de ejercicios y simulacros en las zonas de alto riesgo volcánico.

El conocimiento de área volcánica, de sus habitantes, de su marco cultural y económico son el factor básico para obtener un escenario de evacuación próximo a la realidad. Estos factores son mas importantes que los factores físicos como modelo digital de elevación y la red viaria.

CAPITULO 8

Conclusions

8 Conclusions

In this work a methodology has been developed for a massive evacuation management in case of volcanic emergency. This methodology includes the development of a software package to model the evacuation process and scripts for the Geographical Information System. It also includes a set of data tables to be used in a Geographical Information System, information taken from public administration data and the developed evacuation model software. The evacuation model has been applied in three different cases. The first one deals with the total evacuation of Icod de los Vinos municipality (Tenerife, Spain). The second one deals with the Chichon volcano's environment (Chiapas, Mexico). The third one, volcano Popocatepetl (Mexico), the results supply by the evacuation model are compared with a real evacuation of more than fifteen thousand people occurred in the State of Mexico in December 2000.

The volcanic crisis management current model is exposed and discussed showing tools that are developed from the results of the International Decade for Natural Disaster Reduction. Means available for the crisis management are analyzed, highlighting the importance of having a compatible evacuation model software with modern eruptive scenarios for Emergency Plans elaboration support.

The problematic of hurricane massive evacuation models, which has abundant bibliography, is analyzed in order to conclude with main element models and compare them with a volcanic activity process and their application in a evacuation model for volcanic eruptions.

The main elements that determine the evacuation process are defined: population distribution and its behavior and road network set. The detail level of work is defined by the scale of the data available. In order to integrate all information in the Geographical Information System, cartography problems, associated with the scale, criteria of initial designs and projection system, must be solved. The population data integration in the Geographical Information System has demanded the adequacy of the official information in order to join them with the cartography. Depending on the scale, the reached level varies from building to town. Some scripts are programmed, using a geographical information system programming language, in order to obtain the data structure that is needed by the evacuation model. Vectorial data type, instead of raster data type, have been chosen for turning the road link polyline layer into point layer (X,Y), which are joined with closer inhabitants value.

A C++ program has been developed to model massive evacuations in volcanic crises emergencies. An object point is set and its attributes have all the information exported from the Geographical Information System and specific data fields necessary for the evacuation model. This application uses distribution functions to represent the population behavior and three sections linear adjustment in order to represent the speed variation in each road network

point, depending on density flow. The temporal discretization step must be lower than the spatial discretization divided by the maximum speed considered in the road network. The evacuation model allows to divide the work area into zones and to set evacuation priorities in each one. External events simulated by random functions can be introduced in the evacuation model to represent panic situations or road blocks. Results from the evacuation model correspond to the evolution of prepared people, who are waiting and flowing, together with traffic delays information.

In Icod de los Vinos Municipality, a detail scale has been used (building level) where the spatial discretization step is 10 meters and temporal discretization step is 0,2 seconds. Two evacuation scenarios, corresponding to unexpected and organized auto-evacuations, has modeled four times using two different zonal distributions and changing the population time training value in each one. Evacuation time to evacuate completely the Icod de los Vinos Municipality varies between 2 and 20 hours, with an average time of 6 hours. This strong variation in evacuation time is due to the different training time used. Results show the need of a correct evacuation plan and the roll that a evacuation model can play in this process.

We have had the opportunity to participate in the management of a volcanic crisis exercise, developed at the Chichon volcano. The exercise started with the volcano reactivation and finished with a real evacuation which allowed us to evaluate the eruptive and evacuation scenarios software models. Models have been applied in a extensive area, including final evacuate destination points. The spatial discretization step is 100 meters and temporal discretization step is 2 seconds and the population is distributed in towns on a small scale. Two scenarios have been considered, which correspond to two different zonal distributions. In both, an organized evacuation has been modeled with the same population training time. Obtained evacuation times are between 8 and 18 hours, depending on the chosen evacuation destination points. The time that a vehicle spends to go from Chapultenango to Tuxtla Gutiérrez in normal traffic conditions lasts 5 hours.

In the chapter dedicated to the volcano Popocatepetl, the problematic of a real evacuation is analyzed thanks to the information provided by the Civil Defense of Mexico State. The modeled evacuation corresponds to the real evacuation carried out on December 19th 2000 at 01:30 am., where more than fifteen thousand people were mobilized. The evacuation time was between 5 and 6 hours.

The maximum road speed and capacity adjustments are critical for the simulations' results. In order to determine them, numerous simulations must be done so that it is possible to verify that the obtained results are among reasonable margins.

A sudden incorporation to a high contingent of people in evacuation generates traffic delay. In any evacuation process, massive incorporations in short time have to be avoided. Instead, a gradual process in a short time minimizes traffic delays, specially when an auto-evacuation is running. Sudden incorporation can only be carried on when some exit points are available, a very good planning exists and there is an effective traffic control.

Sequential zonal evacuations obtain a very low traffic delay value but the final evacuation time is higher than in simultaneous evacuations. They are a good option in certain circumstances, but they need a suitable preparation and organization in order that they could be carried out successfully. It is better not doing it if previous simulacrum have not been carried out.

In simultaneous evacuations, lower values in evacuation time are obtained. However, traffic delay values are higher. This situation increases the uncertainty degree and the evacuation time, that can derive in a notable increase.

Finally, the application of this evacuation model in three volcanic areas with different problems has allowed to establish some recommendations:

- To improve the quality, update process and management of population and cartographic data, emphasizing the need of population information georeference.
- To search/obtain information about the population's behavior in an emergency situation.
- To consider the importance of operators training for the suitable managing of simulation tools.
- The results obtained by means of evacuations model reveal the critical points of road network, allowing to recommend to the administration the search for solutions.
- The model shows that population's behavior is critical to minimize the evacuation time. It demands the development of an educational program and the accomplishment of exercises and practices in volcanic risk areas.

The more exhaustive the physical and socioeconomic knowledge of the volcanic area of study is, the more realistic the results will be for each of the methodological steps, and the more trustworthy the obtained evacuation scenarios will be.

APÉNDICES

Apéndices

A.Apéndice scrips GIS

Scrip realizado en AVENUE para ArcView 3.2. Modificado del scrip incluido en la extensión Route hatch

```
' Name: Evacua.AddPointAcrossLine
'
' Title: Añade puntos a lo largo de una línea
'
' Topics: Views
'
' Description: Añade puntos a lo largo de una línea manteniendo igual distancia entre
ellos.
'               Añade los datos de número de vía principal y secundaria.
'
' Requires: Un tema de líneas. Las líneas deben estar seleccionadas para que funcione.
'
' Self:
'
' Returns:
'-----

' VERIFICACION INICIAL
'-----
theProject = av.GetProject
theView = av.GetActiveDoc
'Si no hay temas en la vista.
if (theView.GetThemes.Count = 0) then
  MsgBox.Error("No hay temas en la vista", "No puedo seguir trabajando")
  exit
end

' Si hay algún tema que está siendo editado
editThm = theView.GetEditableTheme
if (editThm <> nil) then
  doSave = MsgBox.YesNoCancel("Guardar datos de "+editThm.GetName+"?", "Stop Editing", true)
  if (doSave = nil) then
    return nil
  end
  if (editThm.StopEditing(doSave).Not) then
    MsgBox.Info("Imposible guardar datos de "
      + editThm.GetName +", Por favor, use Save Edits As como opción", "")
    return nil
  else
    theView.SetEditableTheme(NIL)
  end
end
end
' ' SELECCION TEMA INICIAL
'-----
mylist1 = theView.GetThemes
elTemaOri = MsgBox.ChoiceAsString(mylist1, "Seleccione el tema inicial",
"Selecciona el primer tema de entrada")
' Si se aprieta cancel
```

```
if (elTemaOri=nil) then
  msgbox.info("No ha seleccionado nada","Saliendo de la ejecución de script")
  exit
end
' Si el tema no es de puntos
if ((elTemaOri.GetFTab.FindField("Shape").GetType = #FIELD_SHAPELINE).Not) then
  MsgBox.Info("El tema seleccionado debe ser de lineas","Error")
  return nil
  exit
end
' Si el tema no es editable
if (elTemaOri.CanEdit.Not) then
  msgbox.Error("Imposible añadir campos al tema", "Tema no editable")
  return nil
end

' DEFINIR TABLA Y CREAR UN BITMAP
'-----
laTabla      = elTemaOri.GetFTab
losCampos    = laTabla.GetFields.Clone
C_Shape      = laTabla.FindField("shape")
C_idvia      = laTabla.FindField("Cadcolcal")
C_idvia2     = laTabla.FindField("Cadcolcal2")

NumRegistros = laTabla.GetNumRecords
'elBitmap    = Bitmap.Make(NumRegistros)
elBitmap     = laTabla.GetSelection
NumBitmap    = elBitmap.GetSize

' CREAR UN TEMA TEMPORAL TIPO POLYLINEM
'-----

'Crear el nuevo shp polylineM.

tempoShp     = av.GetProject.MakeFileName("temp","shp")
tempoTabla   = Ftab.MakeNew(tempoShp,PolyLineM)
tempoTabla.StartEditingWithRecovery
IdCampo      = Field.Make("ID",#FIELD_DECIMAL,8,0)
IdVia        = Field.Make("Id_via",#FIELD_SHORT,5,0)
IdVia2       = Field.Make("Id_via2",#FIELD_SHORT,5,0)
tempoTabla.AddFields({IdCampo,IdVia,IdVia2})
C_tmShape    = tempoTabla.FindField("shape")

'Convertir la polilynes en polylinesM atendiendo a la selección de registros.

if(NumBitmap > 0 ) then
  losDatos = laTabla.GetSelection
else
  losDatos = laTabla
end

For each rec in losDatos
  elShape    = laTabla.ReturnValue(C_shape,rec)
  elShapeM   = elShape.AsPolyLineM
  V_idviaM   = laTabla.ReturnValueNumber(C_idvia,rec)
  V_idvia2M  = laTabla.ReturnValueNumber(C_idvia2,rec)
  NuevosDatos = tempoTabla.AddRecord
  tempoTabla.SetValue(C_shape,NuevosDatos,elShapeM)
  tempoTabla.SetValue(IdVia,NuevosDatos,V_idviaM)
  tempoTabla.SetValue(IdVia2,NuevosDatos,V_idvia2M)
End
tempoTabla.StopEditingWithRecovery(true)

TemaLinea   = Ftheme.Make(tempoTabla)
```



```

TablaLinea = TemaLinea.GetFTab
C_linShape = TablaLinea.FindField("shape")
C_linVia   = TablaLinea.FindField("Id_via")
C_LinVia2  = TablaLinea.FindField("Id_via2")

' CREAR TEMA DE PUNTOS Y SU TABLA
'-----
Nombre_tema = MsgBox.Input("Indica el nombre del tema de puntos",
"Crea el tema de puntos", "D:\JOSE\PROYECT_TESIS\GIS\temp\point.shp")
if (Nombre_tema = nil) then
    return nil
end

elTemapt   = Nombre_Tema.AsFileName
laTablapt  = FTab.MakeNew(elTemapt, point)
C_idpt     = Field.Make("Id_pnt", #FIELD_DECIMAL, 8, 0)
C_Dispt    = Field.Make("dist", #FIELD_DECIMAL, 12, 4)
C_idviapt  = Field.Make("Id_via", #FIELD_SHORT, 5, 0)
C_idvia2pt = Field.Make("Id_via2", #FIELD_SHORT, 5, 0)
laTablapt.AddFields({C_idpt, C_Dispt, C_idviapt, C_idvia2pt})
laTablapt.SetEditable(true)
C_shapept  = laTablapt.FindField("shape")

' ESPECIFICA LA DISTANCIA DE SEPARACIÓN DE LOS PUNTOS
Dispttxt = MsgBox.Input("Indica la distancia entre los puntos",
"Distancia de separación entre puntos", "10")
if (Dispttxt = nil) then
    return nil
end

Distpnt = Dispttxt.AsNumber

' PROCESADO DE DATOS
for each lineRec in TablaLinea
    Idpt = 0

'Adquirir algunas estadísticas de las líneas.

    V_LinVia   = TablaLinea.ReturnValue(C_LinVia, lineRec)
    V_LinVia2  = TablaLinea.ReturnValue(C_LinVia2, lineRec)
    theLineM   = TablaLinea.ReturnValue(C_linShape, lineRec)
    theLength  = theLineM.ReturnLength
    theLineM.SetMAsLength
    decimales1 = (theLength / Distpnt)
    decimales2 = decimales1 - decimales1.round

'If we are using a specified distance, the number of points per
'line will change depending on the line length.
    if (decimales2 <= 0.5) then
        numPnts = (((theLength / Distpnt)+1).truncate)
    else
        numPnts = ((theLength / Distpnt).truncate)
    end

'If the line is shorter than the specified distance, we only
'add 1 point, at the endpoint of the line.

    if(numPnts = 0) then
        numPnts = 1
    end

    for each aNum in 1 .. numPnts

```

```
'Set the point's ID value
Idpt = Idpt + 1

'Get the measure along the line.
theM = theLineM.GetMatLength((Distpnt * aNum) - Distpnt).Get(0)

'Get the XY location of this point. We convert the MultiPointM to a point.
thePoint = theLineM.PointEvent(theM,0).ReturnCenter

'Add the point to the new point theme at this position. We
'also add the distance along the line as an attribute.
pntRec = laTablapt.AddRecord
laTablapt.SetValue(C_shapept,pntRec,thePoint)
laTablapt.SetValue(C_idpt,pntRec,Idpt)
laTablapt.SetValue(C_Dispt,pntRec,theM)
laTablapt.SetValue(C_idviapt,pntRec,V_LinVia)
laTablapt.SetValue(C_idvia2pt,pntRec,V_LinVia2)

end
end

' BORRAR EL ARCHIVO TEMPORAL CREADO
'-----
theTempFile = tempoShp.AsString
'de la tabla original
losCampos = nil

'del polylineM
tempoShp = nil
tempoTabla = nil
C_tmShape = nil
IdCampo = nil
IdVia = nil
IdVia2 = nil

'del for each para crear el polylineM
elShape = nil
elShapeM = nil
V_idviaM = nil
V_idvia2M = nil
NuevosDatos = nil

'de la replica del polylineM
TemaLinea = nil
TablaLinea = nil
C_linShape = nil
C_linVia = nil
C_LinVia2 = nil

av.PurgeObjects
theTempFile = theTempFile.Left(theTempFile.Count - 4)
for each theExt in {"shp","shx","dbf"}
file.Delete((theTempFile.AsString+"."+theExt).AsFileName)
end

' AÑADIR EL TEMA DE PUNTOS A LA VISTA
'-----
laTablapt.SetEditable(false)
InThm = FTheme.Make(laTablapt)
theView.AddTheme(InThm)
InThm.SetVisible(true)
'END OF FILE
```

B.Apéndice. Funciones C++ utiliza Borland Builder 6

Función de incorporación

```
// t0 tiempo medio, s dispersión en mapa.ini en segundos
double normal(double t, double t0, double s)
{
double nm, kk;
kk = 1/(sqrt(2*M_PI)*s);
nm = kk*exp(-(t-t0)*(t-t0)/(2*s*s));
return nm;
}
```

Función velocidad instantánea

```
// calcula velocidad en función % de llenado
double velocidad(double lleno_porcentaje, double velocidad_maxima)
{
double v;
if(lleno_porcentaje < p1)v = (p1 + c1 - lleno_porcentaje)/(p1 + c1);
if(lleno_porcentaje < p2 && lleno_porcentaje >= p1)v = c1*(p2 + c2 - lleno_porcentaje)/
((p1 + c1)*(p2 - p1 + c2));
if(lleno_porcentaje >= p2)v = c1*c2*(100.0 - lleno_porcentaje)/((100.0-p2)*(p1 + c1)*(p2 -
p1 + c2));
if(v<0.10)v=0.10;
if(v>0.99)v=0.99;
return velocidad_maxima*v;
}
```

Creación de la LIFO

```
void buffer(int zona) // calcula las rutas de evacuación
{
TStringList *Buffer = new TStringList; // pilas alfanuméricas
TStringList *Lifo = new TStringList; // el asterisco indica que se desconoce el tamaño
final
TStringList *Ruta = new TStringList;
int *distancia;
short int **ruta; // dos asteriscos porque será una matriz, no se
sabe ni nº de columnas nº de ni filas
bool ruta_ok, sumar;
double dx;
int xg, yg;
int i, j, k, l, m, n, d, s, cruce, puntero, cruces;
int via, vial, viaa, pnt, buf, bufa, pnta, max_dis;
int vial, via2;
int punto_salida, punto_salida_final;
AnsiString paso;
punto_salida = -999;
punto_salida_final = -999;
Buffer->Clear(); // extrae la información de buffer y ordenarla
Buffer->Sorted = true;
// la ordenación viene dada por el orden de encadenamiento de datos en la parte inferior
for(i=0;i<n_puntos;i++)
{
if(punto[i].sale && (punto[i].buff_s == zona || zona <0))punto_salida_final = i;
if(punto[i].buffer && (punto[i].buff_s == zona || zona <0)) //si el punto tiene
buffer extrae los siguientes datos
{
if(punto[i].buffer == punto[i].buff_s && zona > -1)punto_salida = i;
paso = "";
}
```

```

        m = punto[i].tipo; // tipo de vía, original
        if(!m)m = 333;
// a la vía tipo 0 se le da el valor 333 solo para el proceso de ordenación
        if(m>0)k = (int)log10((double)m);
        else k = 0;
        for (j=0;j<4-k;j++)paso += "0"; // Añade ceros para regularizar la columna
        paso +=IntToStr(m) + " ";
        //-----
        m = punto[i].buffer; // nº de buffer, original
        if(m>0)k = (int)log10((double)m);
        else k = 0;
        for (j=0;j<4-k;j++)paso += "0";
        paso +=IntToStr(m) + " ";
        //-----
        m = punto[i].id; // nº de via, calculado
        if(m>0)k = (int)log10((double)m);
        else k = 0;
        for (j=0;j<4-k;j++)paso += "0";
        paso +=IntToStr(m) + " ";
        //-----
        if(i>0) k = (int)log10((double)i); // índice del punto en el que está el buffer
        else k = 0;
        for (j=0;j<4-k;j++)paso += "0";
        paso +=IntToStr(i);
        //-----
        Buffer->Add(paso); // adición a la pila buffer
    }
}
if(punto_salida_final != -999)
{
    punto_salida = punto_salida_final;
}
if(punto_salida == -999)
{
    ShowMessage("Error Zona " + IntToStr(zona));
    error = true;
    return;
}
cruces = Buffer->Count; // nº cruces igual al nº de líneas de la pila
if(verborrea)
{
    Buffer->SaveToFile("BUFFER" + IntToStr(zona) + "_" + IntToStr(n_verborrea) + ".DAT");
}
ruta = new short int*[cruces]; // nº total de líneas de la pila buffer
for(i=0;i<cruces;i++)ruta[i] = new short int[6]; // nº parámetros utilizados para cruces
for(i=0;i<cruces;i++) // Inicia espacio reservado para rutas
{
    for(j=0;j<6;j++)ruta[i][j] = 0;
}
Lifo->Clear();
Lifo->Sorted = false; // No debe ordenarse
l = 0;
via = punto[punto_salida].id; // Asigna la calle que corresponda al
punto de evacuación // Asigna el punto de evacuación
pnt = punto_salida;
ruta[l][0] = via;
ruta[l][1] = via;
ruta[l][2] = pnt;
ruta[l][3] = pnt;
ruta[l][4] = 0;
ruta[l][5] = 0;
l++;
Lifo->Add(via); // El primer punto, introducido manualmente, ocupa primera linea de la
lifo

```

```

do          // LIFO, last-input first-output.
{
    vial = StrToInt(Lifo->operator [] (Lifo->Count-1));
//Toma ultima Via entrada para buscar con quien se conecta
    i=0;
do          // Busca en la LIFO que no hay otra via igual, si la hay la
borra
    {
        if(vial == StrToInt(Lifo->operator [] (i)))
        {
            Lifo->Delete(i);
            i = 0;
        }
        else i++;
    }while(i<Lifo->Count);

//-----
for(i=0;i<cruces;i++)          // Cuantos cruces hay sobre esa via (vial)
{
    buf = StrToInt(Buffer->operator [] (i).SubString(7,5));
// Extrae nº de buffer de la pila Buffer como número
    via = StrToInt(Buffer->operator [] (i).SubString(13,5));
// Extrae nº de via de la pila Buffer como número
    if(vial == via)
    {
        for(j=0;j<cruces;j++)
        {
            bufa = StrToInt(Buffer->operator [] (j).SubString(7,5));
// Extrae nº buffer de la pila Buffer como número
            viaa = StrToInt(Buffer->operator [] (j).SubString(13,5));
// Extrae nº via de la pila Buffer como número
            if(vial != viaa && buf == bufa) // Si la viaa tiene el mismo buffer
            {
                ruta_ok = true;          // camino bueno
                //-----
                for(k=0;k<cruces;k++)
// revisa si el cruce está hecho y comprueba su longitud ???
                {
                    if(viaa == ruta[k][1]) ruta_ok = false;
                }
                //-----
                if(ruta_ok)
// si es una ruta nueva la carga en la lifo y en la matriz de cruces
                {
                    pnt = StrToInt(Buffer->operator [] (i).SubString(19,5));
                    pnta = StrToInt(Buffer->operator [] (j).SubString(19,5));
                    Lifo->Insert(0,IntToStr(viaa));
                    ruta[l][0] = viaa;    // via llegada
                    ruta[l][1] = vial;    // via salida
                    ruta[l][2] = pnta;    // punto llegada
                    ruta[l][3] = pnt;    // punto salida
                    ruta[l][4] = 0;      // distancia en n cruces
                    ruta[l][5] = 0;      // distancia
                    l++;
                }
            }
        }
    }
}while(Lifo->Count);
n_cruces += 1;
cruces = l;
//-----FINAL LIFO-----
k = punto[punto_salida].id;          // nº via de evacuación

```

```
for(i=0;i<cruces;i++) //Calcula las distancias
{
    if(k== ruta[i][1])
    {
        ruta[i][4] = 1;
        ruta[i][5] = abs(i-ruta[i][1]);
    }
    else ruta[i][4] = 0;
}
// El lazo anterior sirve para asignar valores iniciales de distancia
k = 1;
max_dis = 0;
do
{
    for(i=0;i<cruces;i++)
    {
        if(ruta[i][4] == k)
        {
            for(j=0;j<cruces;j++)
            {
                if(ruta[i][0] == ruta[j][1] && !ruta[j][4])
                {
                    ruta[j][4] = k + 1;
                    ruta[j][5] = abs(ruta[i][2] - ruta[j][3]) + ruta[i][5];
                    max_dis += ruta[j][5];
                }
            }
        }
        k++;
        ruta_ok = true;
        for(i=0;i<cruces;i++)
        {
            if(!ruta[i][4])ruta_ok = false;
        }
    }while(!ruta_ok);
    Ruta->Clear();
    for(i=0;i<cruces;i++)
    {
        Ruta->Add(
            IntToStr(i) + ", " +
            IntToStr(ruta[i][0]) + ", " +
            IntToStr(ruta[i][1]) + ", " +
            IntToStr(ruta[i][2]) + ", " +
            IntToStr(ruta[i][3]) + ", " +
            IntToStr(ruta[i][4]) + ", " +
            IntToStr(ruta[i][5]));
    }
    if(verborrea)Ruta->SaveToFile("CRUCES" + IntToStr(zona) + "_" + IntToStr(n_verborrea) +
".DAT");
    //----- ASIGNAR CRUCES A CADA PUNTO
    for(i=0;i<n_puntos;i++)
    {
        if(punto[i].buff_s == zona || zona < 0) // si el punto esta en la zona
        {
            k = punto[i].id;
            d = max_dis;
            for(j=0;j<cruces;j++)
            {
                if(k == ruta[j][0] && d > ruta[j][5])
                {
                    d = ruta[j][5];
                    cruce = ruta[j][2];
                    puntero = ruta[j][3];
                }
            }
        }
    }
}
```

```

                if((cruce - i)>0)sumar = true;
                else          sumar = false;
            }
        }
        punto[i].cruce      = cruce;
        punto[i].puntero   = puntero;
        punto[i].sumar     = sumar;
        punto[i].distancia = d;
    }
}
Buffer->Clear();
delete Buffer;
}

```

Función de control evacuación

```

void evacua(void) //----- DIRIGE LA EVACUACION
{
int i, j, s, m, k, kk, hh, mm, ss;
int n_iteracion, c_iteracion;
double quedan, tiempo_por_evacuados, ya_evacuados;
bool vale;
time_t tcalculo, torigen;
AnsiString hora, horas;
quedan = 0;
for(i=0;i<n_puntos;i++) // Asignación inicial de valores
{
    punto[i].en_casa      = punto[i].habitantes;
    punto[i].en_espera   = 0;
    punto[i].en_circulacion = 0;
    punto[i].limbo       = -1.0;
    punto[i].transfiere   = false;
    punto[i].pasos        = 0;
    punto[i].n_pasos      = 0;
    if(punto[i].sale)quedan = +punto[i].en_casa;
}
dls = 3600.0*dt;
iteracion = 0;
circulan = 0;
encasa = 0;
esperan = 0;
n_iteracion = (int)(900.0/dt);
c_iteracion = 0;
quit = false;
s = 0;
m = 0;
k = 0;
if(dt<1)kk = (int)1.0/dt;
else kk = 1;
evacuados = 0;
for(i=0;i<n_punto_evacuacion;i++)
// cuenta el número de personas que ya estan en todos los puntos de evacuación
{
    evacuados += punto[punto_evacuacion[i]].en_casa;
}
if(!n_zonas_evacuar || simultaneas)
{
    prior_act = -999;
    habitantes_evacuar = (double)total_habitantes - quedan;
    for(i=0;i<n_zonas;i++)t_zona[i] = 0;
    n_zonas_evacuar = 0;
}
else
{

```

```
    Beep();
    prior_act = 0;
    habitantes_evacuar = (double)total_habitantes_evacuar - quedan;
    for(i=0;i<n_zonas;i++)t_zona[i] = -999.0;
    t_zona[prior_act] = 0;
}
Form1->Shapel->Brush->Color = clLime;
n_info = 100;
k_info = 0;
semaforo = 0;
info_zonas(0);
torigen = time(NULL);
tiempo_por_evacuados = 0;
ya_evacuados = 0;
do
{
    // transfiere todos los valores de semáforos y limbo
    semaforo = 0;
    iteracion++;
    s++;
    m++;
    k++;
    for(j=0;j<n_zonas;j++)
    {
        if(t_medio[1]>0)
        {
            fraccion[j] = dt*(relacion[0]*normal(t_zona[j],t_medio[0],s_normal[0]) +
                relacion[1]*normal(t_zona[j],t_medio[1],s_normal[1]));
        }
        else
        {
            fraccion[j] = dt*normal(t_zona[j],t_medio[0],s_normal[0]);
        }
        if(t_zona[j]>-1.0)t_zona[j] += dt;
    }
    for(i=0;i<n_puntos;i++)celda(i); //función celda, calcula que pasa dentro de la
celda
    actualiza();
    if(k==kk)
    {
        info_zonas(iteracion);
        k = 0;
    }
    if(s == salida_cada && salida_cada > 0)
    {
        info_punto(iteracion);
        s = 0;
    }
    if(prior_act >-1)
    {
        quedan = 0;
        vale = false;
        for(i=0;i<n_puntos;i++)
        {
            if(zonas[prior_act] == punto[i].buff_s && !punto[i].sale)
            {
                quedan += punto[i].en_casa;
                vale = true;
            }
        }
        if(quedan < 10.0 && vale)
        {
            if(prior_act<n_zonas_evacuar)
            {
```



```

        prior_act++;
        t_zona[prior_act] = 0;
        Beep();
    }
}
Application->ProcessMessages(); // actualización de los mensajes de Windows
hh = (int)(((double)iteracion)*dt/3600.0);
mm = (int)(((double)iteracion)*dt/60.0) - 60*hh;
if (hh<10)hora = "0" + IntToStr(hh) + ":";
else hora = IntToStr(hh) + ":";
if (mm<10)hora += "0" + IntToStr(mm);
else hora += IntToStr(mm);
tcalculo = time(NULL) - torigen;
hh = tcalculo/3600;
mm = (tcalculo - 3600*hh)/60;
ss = tcalculo - 3600*hh - 60*mm;
if (hh<10)horas = "0" + IntToStr(hh) + ":";
else horas = IntToStr(hh) + ":";
if (mm<10)horas += "0" + IntToStr(mm) + ":";
else horas += IntToStr(mm) + ":";
if (ss<10)horas += "0" + IntToStr(ss);
else horas += IntToStr(ss);
tiempo_calculo = "Tiempo " + hora + " " + horas;
tiempo_por_evacuados += (evacuados - ya_evacuados)*(double)iteracion*dt/3600.0;
ya_evacuados = evacuados;
tiempo_viaje = tiempo_por_evacuados/evacuados;
if(mono_cada && !boton_zoom && !quit)
// da opción a detener el proceso en caso afirmativo
{
    if(mono_cada == m)
    {
        m = 0;
        switch(Form1->RadioGroup2->ItemIndex)
        {
            case 1:
                pintar_en_casa();
                break;
            case 2:
                pintar_circulacion();
                break;
            case 3:
                pintar_velocidad();
                break;
            case 4:
                pintar_semaforos();
                break;
        }
    }
}
c_iteracion ++;
if(c_iteracion == n_iteracion)
{
    saca_grafica = true;
    c_iteracion = 0;
}
if(saca_grafica)salida_grafica();
saca_grafica = false;
switch (semaforo)
{
    case 0:
        Form1->Shapel->Brush->Color = clLime;
        break;
    case 1:

```

```
        Form1->Shapel->Brush->Color = clYellow;
        break;
    case 2:
        Form1->Shapel->Brush->Color = clRed;
        break;
    }
    semaforo = 0;
}while(!quit);
Form1->Imagel->Picture->LoadFromFile("MONO.BMP");
Form1->SpeedButton1->Enabled = true;
Form1->SpeedButton3->Down = false;
Form1->Shapel->Brush->Color = clBtnFace;
Form1->Memol->Lines->Add("STOP");
Beep();
}
```

Operaciones sobre objeto punto

```
void celda(int indice) // calcula los procesos dentro del punto
{
    static double paso, velo;
    static int cc;
    static int i,j;
    static bool incorpora;
    AnsiString texto;
    circulan += punto[indice].en_circulacion;
    esperan += punto[indice].en_espera;
    //-----
    if(!indice)
    {
        k_info++;
        if(k_info>n_info)
        {
            k_info = 0;
            Form1->StaticText1->Caption = "Evacuados " + IntToStr((int)(evacuados + 0.1));
            Form1->StaticText2->Caption = tiempo_calculo;
            Form1->StaticText3->Caption = "Circulan " + IntToStr((int)(circulan));
            Form1->StaticText4->Caption = "Esperan " + IntToStr((int)(esperan));
            Form1->StaticText5->Caption = "En Casa " + IntToStr((int)encasa);
            if(!n_zonas_evacuar || prior_act >= n_zonas_evacuar)texto = "Total Evacuar ";
            else texto = "Evacuan ";
            Form1->StaticText6->Caption = texto + IntToStr((int)(habitantes_evacuar));
            if(!n_zonas_evacuar)texto = "Todas las zonas sin orden";
            else
            {
                texto = "Zonas ";
                for(j=0;j<=prior_act;j++)
                {
                    texto += ", " + IntToStr(j+1);
                }
            }
            if(nivel_panico == 1)texto = "Panico";
            Form1->StaticText7->Caption = texto;
        }
        circulan = 0;
        esperan = 0;
        encasa = 0;
    }
    if(punto[indice].sale)
    {
        evacuados += punto[indice].en_circulacion;
        punto[indice].en_casa += punto[indice].en_circulacion;
        punto[indice].en_circulacion = 0;
    }
}
```

```

true;
    if(punto[indice].en_casa < punto_evacuacion_capacidad[i])punto[indice].semaforo =
else punto[indice].semaforo = false;
    if(0.999*habitantes_evacuar < evacuados)
    {
        quit = true;
    }
    return;
}
if(punto[indice].en_casa >0) // si hay gente en casa
{
    paso = fraccion[punto[indice].zona]*punto[indice].habitantes;
    punto[indice].en_casa -= paso; // salen de casa
    punto[indice].en_espera += paso; // pasan a espera
    if(panico && punto[indice].panico > nivel_panico)
    {
        punto[indice].en_espera += punto[indice].en_casa;
        punto[indice].en_casa = 0;
    }
    if(punto[indice].en_casa < 0)punto[indice].en_casa = 0;
}
if(punto[indice].en_circulacion < punto[indice].capacidad)
{
    punto[indice].semaforo = true; // control semáforo
}
else punto[indice].semaforo = false;
if(punto[indice].en_circulacion < punto[indice].capacidad/1.5)
{
    punto[indice].alerta = true; // control semáforo
}
else punto[indice].alerta = false;
if(!punto[indice].alerta )semaforo = 1;
if(!punto[indice].semaforo)semaforo = 2;
velo = velocidad(punto[indice].en_circulacion
    /punto[indice].capacidad,punto[indice].velocidad_max);
cc = (int)(0.5+dls/(velo*dt));
if(cc>punto[indice].n_pasos)punto[indice].n_pasos = cc;
else punto[indice].pasos ++;
if(punto[indice].pasos > punto[indice].n_pasos)
{
    punto[indice].pasos = 0;
    punto[indice].n_pasos = 1;
    punto[indice].transfiere = true;
    punto[indice].velocidad = velo;
    if(punto[indice].en_circulacion < punto[indice].capacidad)
    {
        punto[indice].limbo = punto[indice].en_circulacion;
        punto[indice].en_circulacion = 0;
    }
    else
    {
        punto[indice].limbo = punto[indice].capacidad;
        punto[indice].en_circulacion -= punto[indice].capacidad;
    }
}
if(punto[indice].semaforo)
{
    incorpora = false;
    if(panico && punto[indice].panico > nivel_panico)incorpora = true;
    if(prior_act < 0) incorpora = true;
    if(punto[indice].zona <= prior_act && prior_act <= n_zonas_evacuar)incorpora =
true;
    if(incorpora)
    {
        paso = punto[indice].capacidad

```



```
    }  
    punto[i].limbo = -1.0;  
  }  
}
```

C.Apéndice. Cuestionario USGS

Factores de peligrosidad volcánica	
Tipo de volcán Si el volcán es un cono de cinder, un campo basáltico, un escudo pequeño o un evento fisural: <i>valor = 0</i> Si es un estratovolcán, hay domos, es un complejo volcánico, hay maar o calderas: <i>valor = 1</i>	0-1
Índice de Explosividad Volcánica Máxima Si el máximo VEI conocido es ≤ 2 : <i>valor = 0</i> Si el máximo VEI conocido es = 3 or 4: <i>valor = 1</i> Si el máximo VEI conocido es = 5 or 6: <i>valor = 2</i> Si el máximo VEI conocido es ≥ 7 : <i>valor = 3</i> Si no hay máximo listado en la GVP y el tipo de volcán es 0: <i>valor = 0</i> Si no hay máximo listado en la GVP pero el tipo de volcán es 1: <i>valor = 1</i> Si no hay erupciones Holocenas y el volcán no es un sistema de caldera silicio: <i>valor = 0</i>	0-3
¿Ha tenido actividad explosiva en los últimos 500 años? Si ha tenido una actividad explosiva (VEI ≥ 3) en los últimos 500 años: <i>valor = 1</i>	0-1
¿Cual ha sido la actividad explosiva máxima que ha tenido en los últimos 5000 años? Si ha tenido una actividad explosiva (VEI ≥ 4) en los últimos 500 años: <i>valor = 1</i>	0-1
Periodo de retorno o recurrencia. Si el intervalo entre erupciones está entre 1-99 años: <i>valor = 4</i> Si el intervalo entre erupciones está entre 100 – 1,000 años: <i>valor = 3</i> Si el intervalo entre erupciones está entre 1,000 y varios miles de años: <i>valor = 2</i> Si el intervalo entre erupciones está entre 5,000-10,000 años, o no hay erupciones Holocenas pero si hay un sistema activo con un gran volumen de magma que ha entrado en erupción en los últimos 100,000 años: <i>valor = 1</i> Si no hay erupciones Holocenas conocidas: <i>valor = 0</i>	0-4
¿Ha tenido flujos piroclásticos en el Holoceno? Si los ha tenido: <i>valor = 1</i>	0-1
¿Ha tenido lahares en el Holoceno? Si ha tenido lahares Holocenos a lo largo de los flancos y han alcanzado zonas habitadas: <i>valor = 1</i>	0-1
¿Ha tenido coladas de lava en el Holoceno? Si las coladas de lava han fluido desde la erupción central o de flanco y han alcanzado zonas habitadas: <i>valor = 1</i>	0-1
¿Tiene potencial para producir explosiones hidrotermales? Si el volcán ha tenido actividad explosiones freatomagmática Holocena, y/o el volcán tiene características termales que son suficientemente claras como para inducir una actividad explosiva potencial: <i>valor = 1</i>	0-1
¿Ha producido Tsunamis en el Holoceno? Si ha generado un tsunami en el Holoceno: <i>valor = 1</i>	0-1
¿Tiene potencial para generar colapsos sectoriales? Si el volcán ha generado un colapso sectorial en el Cuaternario-Holoceno y ha reconstruido su edificio o tiene una elevada altitud, con pendientes empinadas y está afectado por una alteración de los materiales importante: <i>valor = 1</i>	0-1
¿Puede generar lahares primarios? Si el volcán tiene una superficie permanente de agua/hielo en su edificio o un volumen de agua $> 106 \text{ m}^3$: <i>valor = 1</i>	0-1
Actividad sísmica observada. Si, desde la última erupción y en ausencia de actividad eruptiva, se detecta actividad sísmica dentro de los 20 km próximos al edificio del volcán: <i>valor = 1</i>	0-1

Deformación del suelo observada. Si, desde la última erupción y en ausencia de actividad eruptiva, se detecta deformación o cualquier otra evidencia de inyección de magma: <i>valor = 1</i>	0-1
Actividad fumarólica o desgasificación magmática observada. Si, desde la última erupción y en ausencia de actividad eruptiva, hay anomalías térmicas o emisión de gases magmáticos: <i>valor = 1</i>	0-1
Suma total de factores de peligro	
Elementos expuestos	
Log₁₀ de la población residente a menos de 30 km del volcán (Volcano Population Index, VPI)	
Log₁₀ de la población residente aguas abajo o aguas arriba del volcán. Población situada fuera del Círculo de 30 km, puede utilizarse depósitos Holocenos o modelos de inundación, especialmente si el volcán tiene capacidad para generar lahares.	
¿Ha causado muertos en periodo histórico? En caso afirmativo y sigue habiendo población permanente. <i>valor = 1</i>	0-1
¿Han habido evacuaciones en periodo histórico? En caso afirmativo y sigue habiendo población permanente. <i>valor = 1</i>	0-1
Aviación local expuesta Si cualquier tipo de volcán está dentro 50 km del radio de un aeropuerto: <i>valor = 1</i> Si el volcán del tipo 1 está dentro de los 300 km de un aeropuerto: <i>valor = 1</i> Si el volcán del tipo 1 está dentro de los 300 km de un aeropuerto internacional: <i>valor = 2</i> Si no se dan ninguno de estos criterios: <i>valor = 0</i>	0-2
Aviación regional expuesta Esta puntuación se basa en el Log ₁₀ del tráfico diario aproximado de pasajeros en cada región. Este rango solo se aplica para los volcanes de tipo 1 o los de tipo 0 que pueden producir erupciones explosivas.	0-1
Infraestructuras de energía expuestas Si hay infraestructuras energéticas (electricidad, conducción gas, electricidad, oil, etc.) en las zonas de peligro, o en un área situada a favor del viento en relación al volcán o demasiado cerca para considerarla expuesta: <i>valor = 1</i>	0-1
Infraestructuras de transporte Si hay infraestructuras de transporte (puertos, líneas de tren, autopistas, etc.) en las zonas de peligro, o en un área situada a favor del viento en relación al volcán o demasiado cerca para considerarla expuesta: <i>valor = 1</i>	0-1
Áreas muy desarrolladas o sensibles expuestas Si hay grandes zonas desarrolladas o zonas importantes expuestas (instalaciones de Parques Nacionales, Proyectos de control de inundaciones, instalaciones gubernamentales, instalaciones turísticas o de recreo, manufactura o cualquier otra actividad económica importante): <i>valor = 1</i>	0-1
El volcán ocupa un área importante de una isla poblada Si los depósitos Holocenos cubren más del 25% de la zona habitada: <i>valor = 1</i>	0-1
Suma total de los factores de exposición	
Total de factores de peligro x Total de factores de Exposición = Threat Ranking	
ESCALA Nivel Riesgo: Muy Alto: 324-124 // Alto: 123-64 // Moderado: 63-30 // Bajo: 30-6 // Muy bajo: 6-0	

Bibliografía

- Ablay, G.J. & Martí, J. 2000. *Stratigraphy, structure, and volcanic evolution of the Pico Teide-Pico Viejo formation, Tenerife, Canary Islands*. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 103: 175–208 pag.
- Agencia EFE 2007. Esto solo lo sabemos salvar nosotros. El País. España. 31 de julio.
- Álvarez-Alonso, A 1988. Comarca de Icod y Daute. En: Afonso, L. (Ed). *Geografía de Canarias nº 5*. Interinsular Canaria, S.A. S/C. de Tenerife, España. 127-154 pag.
- Armienta, A.; De la Cruz-Reyna, S.; Ramos, S.; Macías, J.L.; Aguayo A.; Cenicerros, N. y Cruz, O. 2002. Veinte años de monitoreo geoquímico de la laguna cratérica del Chichón. Conmemoración de los 20 Años de la erupción del Chichón, 1982-2002. s/f. Chiapas, México. 418-419 pag.
- Armienta, M.A.; De la Cruz-Reyna, S.; Gómez, A.; Ramos, E.; Cenicerros, N.; Cruz, O.; Aguayo, A. & Martínez, A. 2008. *Hydrogeochemical indicators of the Popocatepetl volcano activity*. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 170: 35–50 pag.
- Aspinall, W. 2006. Expert judgment elicitation and decision-making: some real world applications. Proceedings of the Expert Judgment: Promises and Pitfalls Workshop. March 13-14, 2006. Washington DC, USA. 44 pag.
- Aspinall, W.P.; Woob, G.; Voight, B. & Baxter, P.J. 2003. *Evidence-based volcanology: application to eruption crises*. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 128: 273-285 pag.
- Aysan, Y. & Davis, I 1993. Rehabilitation and reconstruction after disaster. En: United Nations (UN) and United Nations Department of Humanitarian Affairs. *Disaster Management Training Programme (DMTP)*. Intertect Training Services. USA. 1-49 pag.
- Barberi, F.; Corrado, G.; Innocenti, F. & Luongo, G. 1984. *Phlegrean Fields (1982-1984) Brief chronicle of a volcano emergency in a densely populated area*. Bull. Volc., 47: 175-185 pag.
- Barberi, F.; Davis, M.S.; Isaia, R.; Nave, R. & Ricci, T. 2008. *Volcanic risk perception in the Vesuvius population*. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 172: 244-258 pag.
- Barret, B.; Ran, B. & Pillai, R. 2000. Developing A Dynamic Traffic Management Modeling Framework for Hurricane Evacuation. Proceedings of the Transportation Research Board 79th Annual Meeting. January 9, 2000. Washington, D.C.. 19 pag.
- Baxter, P.J.; Aspinall, W.P.; Neri, A.; Zuccaro, G.; Spence, R.J.S.; Cioni, R. & Woog, G. 2008a. *Emergency planning and mitigation at Vesuvius: A new evidence-based approach*. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 178: 454–473 pag.
- Baxter, P.J.; Boyle, R.; Cole, P; Neri, A.; Spence, R. & Zuccaro, G. 2005. *The impacts of pyroclastic surges on buildings at the eruption of the Soufriere Hills volcano, Montserrat*. Bull. Volc., 67: 292–313 pag.
- Baxter, P.J.; Neri, A. & Blong, R. 2008b. *Evaluating explosive eruption risk at European volcanoes*. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 178: 331-592 pag.

- Berrocal, M. 2008. *Análisis y evaluación de la vulnerabilidad de la población de La Fortuna de San Carlos a la actividad volcánica del Volcán Arenal, Costa Rica*. Tesis doctoral. Institut de Medi Ambient, Universitat de Girona. Barcelona, España. 399 pag.
- Bertolaso, G.; De Bernardinis, B.; Bosi, V.; Cardaci, C.; Ciolli, S.; Colozza, R.; Cristiani, C.; Mangione, D.; Ricciardi, A.; Rosi, M.; Scalzo, A. & Soddu, P. 2009. *Civil protection preparedness and response to the 2007 eruptive crisis of Stromboli volcano, Italy*. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 182: 269-277 pag.
- Bitrán, D. (Coord.) 2001. *Características del Impacto Socioeconómico de los principales Desastres ocurridos en México en el período 1980-99*. Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). Secretaría de la Gobernación. México. 107 pag.
- Bonifaz, R.; Cabrera, A.L. y Gómez, G. 1995. Integración de información cartográfica sobre riesgo volcánico por medio de sistemas de información geográfica. En: Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Secretaria de Gobernación y Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). *Volcán Popocatepetl. Estudios realizados durante la crisis 1994-1995*. CENAPRED. México D.F., México. 93-98 pag.
- Bravo, T. 1962. *El Circo de Las Cañadas y sus dependencias*. Bol. de la Real Sociedad Española de Historia Natural, 60: 93-108 pag.
- Cardona, O.D. 1997. *Management of the volcanic crises of Galeras volcano: Social, economic and institutional aspects*. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 77: 313-324 pag.
- Carniel, R.; Barazza F.; Tárraga, M. & Ortiz, R. 2006. *On the singular values decoupling in the Singular Spectrum Analysis of volcanic tremor at Stromboli*. Natural Hazards and Earth System Sciences, 6: 903-909 pag.
- Carracedo, J.C.; Paterne, M.; Guillou, H.; Pérez-Torrado, F.J.; Paris, R.; Rodríguez-Badiola, E. y Hansen, A., 2003. *Dataciones radiométricas (¹⁴C y ^K/Ar) del Teide y el rift noroeste, Tenerife, Islas Canarias*. Estudios Geológicos, 59: 15-29 pag.
- Carracedo, J.C.; Rodríguez-Badiola, E.; Guillou, H.; Paterne, M.; Scaillet, S.; Pérez-Torrado, F.J.; Paris, R.; Fra-Paleo, U. & Hansen, A. 2007. *Eruptive and structural history of Teide volcano and rift zones of Tenerife, Canary Islands*. Geological Society of America Bulletin, 119: 1027-1051 pag.
- Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). 1994. *Guía para la integración y operación del programa de Protección Civil para el volcán Popocatepetl*. Secretaría de Gobernación. México D.F., México. 86 pag.
- Coburn, A.W.; R.J.S. Spence, R.J.S. & Pomonis, A. 1991. Vulnerabilidad y evaluación de riesgo. En: Organización de Naciones Unidas y Oficina del Coordinador de las Naciones Unidas para el Socorro en casos de Desastre (UNDRO). *Programa de Entrenamiento para el Manejo de Desastres*. Intertect Training Services. USA. 69 pag.
- Coello, J. 1973. *Las series volcánicas en subsuelos de Tenerife*. Estudios Geológicos, 29: 491-512 pag.
- Comité Científico Asesor, CENAPRED-UNAM. 1995. *Volcán Popocatepetl. Estudios realizados durante la crisis 1994-1995*. Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). México D.F., México. 338 pag.
- Consejo Nacional de Población (CONAPO). 2006. *Índices de marginación, 2005*. Consejo Nacional de Población. México D.F., México. 336 pag.
- Cook, R. & Solomatine, D. 1992. EXCALIBUR user's manual. Delft University of Technology/Sologic, 33 pag.

- Cooke, R.M. & Goossens, L.H.J. 2000. Prodedures guide for structured expert judgment. Report to European Commission, EUR - 18820 EN. General Director of Science, Research and Development and European Atomic Energy Commission. Luxengurgo, Bruselas. 50 pag.
- Cova, T.J. & Johnson J.P. 2003. *A network flow model for lane-based evacuation routing*. Transportation Research Part A, 37: 579–604 pag.
- Damiani, M.L.; Groppelli, G.; Norini, G.; Bertino, E.; Gigliuto, A. & Nucita, A. 2006. *A lava flow simulation model for the development of volcanic hazard maps for Mount Etna (Italy)*. Computers & Geosciences, 32: 512–526 pag.
- De la Cruz-Reyna, S. 2002. Qué causó el desastre del Chichón en 1982. Conmemoración de los 20 Años de la erupción del Chichón, 1982-2002. s/f. Chiapas, México. 416-416 pag.
- De la Cruz-Reyna, S. 2004. *Volcanes. Peligro y riesgo volcánico en México*. Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). Secretaria de la Gobernación (SEGOB). México D.F., México. 54 pag.
- De la Cruz-Reyna, S. & Del Pozzo, L.M. 2009. *The 1982 eruption of El Chichón volcano, Mexico: Eyewitness of the disaster*. Geofísica Internacional, 48-1: 21-31 pag.
- De la Cruz-Reyna, S. & Reyes-Dávila, G.A. 2001. *A model to describe precursory material-failure phenomena applications to short-term forecasting at Colima volcano Mexico*. Bull. Volc., 63: 297–308 pag.
- De la Cruz-Reyna, S. & Tilling, R.I. 2008. *Scientific and public responses to the ongoing volcanic crisis at Popocatepetl Volcano, Mexico: Importance of an effective hazards-warning system*. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 170: 121–134 pag.
- De la Cruz-Reyna, S.; Quezada-Catalán, J.L.; Peña-López, C.; Zepeda-Ramos, O. y Sánchez-Pérez, T. 2001. Historia de la Actividad Reciente del Popocatepetl (1354-1993). En: Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), Secretaría de la Gobernación (SEGOB), Instituto de Geofísica de la UNAM. *Las cenizas volcánicas del Popocatepetl y sus efectos para la aeronavegación e infraestructuras aeroportuaria*. CENAPRED. México D.F., México. 3-20 pag.
- Delgado, H.; De la Cruz-Reyna, S. & Tillin, R.I. 2008. *The 1994–present eruption of Popocatepetl volcano: Background, current activity, and impacts*. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 170: 1-4 pag.
- Ewert, J.W.; Guffanti, M. & Murray, T.L. 2005. An Assessment of Volcanic Threat and Monitoring Capabilities in the United States: Framework for a National Volcano Early Warning System. U.S. Geological Survey, 62 pag.
- Fahy, R.F. 1994. Exit 89. An Evacuation Model for high-rise buildings. Model description and example applications. Proceedings of the International INTERFLAM '94 Conference. July 13-17, 1994. Ontario, Canada. 657-668 pag.
- Felpeto, A. 2002. *Modelización física y simulación numérica de procesos eruptivos para la generación de mapas de peligrosidad volcánica*. Tesis doctoral. Departamento de Física de la Tierra, Astronomía y Astrofísica I. Facultad de C. Físicas, Universidad Complutense. Madrid, España. 260 pag.
- Felpeto, A.; Martí, J. & Ortiz, R. 2007. *Automatic GIS-based system for volcanic hazard assessment*. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 166: 106–116 pag.
- Frieser, B. 2004. *Probabilistic evacuation decision model for river floods in the Netherlands*. Tesis doctoral. Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology. Delf, Netherlands. 138 pag.

- Gabinete de Prensa del Gobierno de Canarias. 2009. La Comisión de Protección Civil aprueba el Plan de Atención de Emergencias por Riesgo Volcánico. Web del Gobierno de Canarias (<http://www.gobcan.es>). Canarias. España. 19 de enero.
- Gaillard, J.C. 2008. *Alternative paradigms of volcanic risk perception: The case of Mt. Pinatubo in the Philippines*. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 172: 315-328 pag.
- García, A.; Vila, J.; Ortiz, R.; Macía, R.; Sleeman, R.; Marrero, J.M.; Sánchez, N.; Tárraga, M. & Correig, A.M. 2006. *Monitoring the Reawakening of Canary Island's Teide Volcano*. EOS, 87 (6): 65 pag.
- Grazia, A. 1976. Disaster prediction and political decision: the case of Guadeloupe, 1976. Comunicación personal. Università degli Studi di Bergamo. Italia. 6 pag.
- Houston, N. 2006. Using Highways during evacuation operations for events with advance notice. Report to U.S. Federal Highway Administration and U.S. Department of Transportation. Booz allen Hamilton. Washington, D.C., USA. 88 pag.
- Instituto Canario de Estadística (ISTAC). 2002. *Estadísticas de condiciones sociales*. Consejería de Economía, Hacienda y Comercio del Gobierno de Canarias. Canarias. España. 127 pag.
- Jaquet, O.; Connor, C. & Connor, L. 2008. *Probabilistic Methodology for Long Term Assessment of Volcanic Hazards*. Nuclear technology, 163-1: 180-189 pag.
- Kadie, C.M.; Hovel, D. & Horvitz, E. 2001. MSBNx: A Component-Centric Toolkit for Modeling and Inference with Bayesian Networks. Microsoft Research. 33 pag. <http://research.microsoft.com/adapt/MSBNx/>. Fecha de consulta: 16/10/2008.
- Kwan, M.P. & Lee, J. 2005. *Emergency response after 9/11: the potential of real-time 3D GIS for quick emergency response in micro-spatial environments*. Computers, Environment and Urban Systems, 29: 93–113 pag.
- Lirer, L. & Vitelli, L. 1998. *Volcanic Risk Assessment and Mapping in the Vesuvian Area Using GIS*. Natural Hazards, 17: 1–15 pag.
- Liu, C. & Tuttle, M. 2008. Emergency evacuation plan maintenance. En: Shekhar, S & Xiong, H. (Eds.). *Encyclopedia of GIS*. Springer. s.d. 267-274 pag.
- Llinares, A.; Ortiz, R. y Marrero, J.M. 2004. *Riesgo Volcánico. Programa para centros escolares. Guía didáctica para profesores*. Dirección General de Protección Civil y Emergencias. Ministerio del Interior. España. 103 pag.
- Lu, Q.; Huang, Y. & Shekhar, S. 2003. Evacuation Planning: A Capacity Constrained Routing Approach: 111–125 pag. In: Chen, H.; Miranda, R.; Zeng, D.D.; Demchak, C. & Madhusudan, T. (Eds.). *Lecture Notes in Computer Science*. Proceeding from the First NSF/NIJ Symposium, ISI, June 2-3, 2003. Tucson, AZ, USA. 392.
- Macedonio, G.; Costa, A. & Folch, A. 2008. *Ash fallout scenarios at Vesuvius: Numerical simulations and implications for hazard assessment*. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 178: 366–377 pag.
- Macías, J.L. 2005. *Geología e historia eruptiva de algunos de los grandes volcanes activos de México*. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Tomo LVII, núm. 3: 379-424 pag.
- Macías, J.L.; Arce, J.L.; Scolamacchia, T.; Rouwet, D.; García, A.; Espíndola, J.M.; Taran, Y. 2007. El Chichón Volcano: a field trip guide. 25th anniversary A Commemorative Conference. March 23-25, 2007. Chiapas, México. 28 pag.
- Macías, J.L.; Capra, L.; Scott, K.M.; Espíndola, J.M.; García-Palomo, A & Costa, J.E. 2004. *The 26 May 1982 breakout flows derived from failure of volcanic dam at El Chichón, Chiapas, Mexico*.

Geological Society of American Bulletin, 116: 233-246 pag.

- Macías, J.L.; Carrasco, G. y Siebe, C. 1995. Zonificación de peligros volcánicos del Popocatepetl. En: Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Secretaria de Gobernación y Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). *Volcán Popocatepetl. Estudios realizados durante la crisis 1994-1995*. CENAPRED. México D.F., México. 79-92 pag.
- Macías, J.L.; Sheridan, M.F. & Espíndola, J.M. 1997. *Reappraisal of the 1982 eruptions of El Chichón Volcano, Chiapas, Mexico: New data from proximal deposits*. Bull. of Volc., 58: 459-471 pag.
- Manole, S.W.; Miller, C.A. & Neil, D.B. 2001. *Traffic Flow Models and the Evacuation Problem*. UMAP Journal, 22-3: 271-290 pag.
- Margulis, L.; Charosky, P. & Fernández, J. 2006. Hurricane evacuation decision-support model for bus dispatch. The INFORMS students Newsletter.1-20 pag. <http://ormstomorrow.informs.org/archive/Summerfall06/>. Fecha de consulta 13/11/2008.
- Marrero, J.M.; Rodríguez-Losada, J.A. & Ortiz, R. 2008. Evacuation management GIS tools volcanic crisis: Application to the north side of Tenerife. Proceedings of the European Geosciences Union General Assembly. April 13-18, 2008. Viena, Austria. 1 pag.
- Martí, J. & Geyer, A. 2008. *Central vs flank eruptions at Teide–Pico Viejo twin stratovolcanoes (Tenerife, Canary Islands)*. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 178: 543-552 pag.
- Martí, J.; Aspinall, W.P.; Sobradelo, R.; Felpeto, A.; Geyer, A.; Ortiz, R.; Baxter, P.; Cole, P.; Pacheco, J.; Blanco, M.J. & Lopez, C. 2008a. *A long-term volcanic hazard event tree for Teide-Pico Viejo stratovolcanoes (Tenerife, Canary Islands)*. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 178: 543–552 pag.
- Martí, J.; Geyer, A.; Andujar, J.; Teixidó, F. & Costa, F. 2008b. *Assessing the potential for future explosive activity from Teide–Pico Viejo stratovolcanoes (Tenerife, Canary Islands)*. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 178: 529–542 pag.
- Martí, J.; Ortiz, R.; Gottsmann, J.; Garcia, A. & De LaCruz-Reina, S. 2009. *Characterising unrest during the reawakening of the central volcanic complex on Tenerife, Canary Islands, 2004-2005, and implications for assessing hazards and risk mitigation*. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 182: 23-33 pag.
- Martí, J.; Spence, R.; Calogero, E.; Ordoñez, A.; Felpeto, A. & Baxter, P. 2008c. *Estimating building exposure and impact to volcanic hazards in Icod de los Vinos, Tenerife (Canary Islands)*. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 178: 553–561 pag.
- Marzocchi, W. & Woo, G. 2007. *Probabilistic eruption forecasting and the call for an evacuation*. Geophysical Research Letters, 34: pag.
- Marzocchi, W.; Sandri, L. & Selva, J. 2008. *BET_EF: a probabilistic tool for long- and short-term eruption forecasting*. Bull. Volcanol, 70: 623-632 pag.
- Mei, B. 2002. *Development of trip generation models of hurricane evacuation*. Tesis doctoral. The Department of Civil and Environmental Engineering, Luisiana State University. Luisiana, USA. 114 pag.
- Newhall, C.G. & Hoblitt, R.P. 2002. *Constructing event trees for volcanic crises*. Bull. Volcanol., 64: 3-20 pag.
- Newhall, C.G. & Self, S. 1982. *The volcanic explosivity index (VEI): An estimate of explosive magnitude for historical volcanism*. Journal of Geophysical Research, 87 (C2): 1231–1238 pag.
- Office of the United Nations Disaster Relief Coordinator (UNDRO) and United Nations Educational Scientific and Cultural Organization (UNESCO). 1985. Volcanic Emergency Management.

United Nations, 86 pag.

- Ongaro, T.E.; Neri, A.; Menconi, G.; de'Michieli Vitturi, M.; Marianelli, P.; Cavazzoni, C.; Erbacci, G. & Baxter, P.J. 2008. *Transient 3D numerical simulations of column collapse and pyroclastic density current scenarios at Vesuvius*. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 178: 378–396 pag.
- Ortiz, R. (Eds.) 1996. *Riesgo Volcánico*. Servicio de Publicaciones del Excmo. Cabildo de Lanzarote. Madrid, España. 304 pag.
- Ortiz, R.; García A y Astiz, M. 2001. *Instrumentación en Volcanología*. Servicio de Publicaciones del Excmo. Cabildo Insular de Lanzarote.. Madrid, España. 345 pag.
- Ortiz, R.; Moreno, H.; García, A.; Fuentealba, G.; Peña, P. & Tárraga, M. 2003. *Villarrica volcano (Chile): characteristics of the volcanic tremor and forecasting of small explosions by means of a material failure method*. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 128: 247-259 pag.
- Paton, D.; Smith, L.; Daly, M. & Johnston, D. 2008. *Risk perception and volcanic hazard mitigation: Individual and social perspectives*. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 172: 179-188 pag.
- Perry, R.W. & Lindell, M.K. 2007. *Volcanic risk perception and adjustment in a multi-hazard environment*. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 172: 170-178 pag.
- Plunket, P. & Uruñuela, G. 2008. *Mountain of sustenance, mountain of destruction: The prehispanic experience with Popocatepetl Volcano*. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 170: 111–120 pag.
- Post; Buckley; Schuh & Jerningan. 1999. Transportation Analysis. East Central Florida Regional Planning Council 1999 Hurricane Evacuation Study. .70 pag. <http://www.ecfrpc.org/getattachment/17177c60-2e78-474d-a957-aa6fe598b44c/Transportation-Analysis.aspx?disposition=attachment>. Fecha de consulta: 09/12/2008.
- Prohom, M.J. 2003. *Incidencia de les grans erupcions volcaniques en el clima de La Península Ibérica i Balears*. Tesis doctoral. Departament de Geografia Física i Anàlisi Geogràfica Regional, Universidad de Barcelona. Barcelona, España. 226 pag.
- Protezione Civile (DPC) 1995. Pianificazione Nazionale d'Emergenza dell'Area Vesuviana. Act. 2001. Dipartimento della Protezione Civile, Presidenza del Consiglio dei Ministri, 157 pag.
- Romero, C. 1992. *Estudio Geomorfológico de los volcanes históricos de Tenerife*. Publicaciones Científicas del Aula de Cultura de Tenerife. Excmo. Cabildo Insular de Tenerife. S/C. de Tenerife, España. 265 pag.
- Scaini, C. 2009. *Metodologia in ambiente GIS per la valutazione del danno provocato da un evento vulcanico a Icod de los Vinos, Tenerife*. Tesis doctoral. Dipartimento di Georisorse e Territorio. Faculta di Ingegneria, Università degli studi di Udine. Udine, Italia. 93 pag.
- Scarpa, R. & Tilling, R.I., (Eds.) 1996. *Monitoring and mitigation of volcano hazards*. Springer-Verlag. Heidelberg. 841 pag.
- Siebe, C. & Macías, J.L. 2004. *Volcanic hazards in the Mexico City metropolitan area from eruptions at Popocatepetl, Nevado de Toluca, and Jocotitlán stratovolcanoes and monogenetic scoria cones in the Sierra de Chichinautzin Volcanic Field*. Geological Society of America, Fieldtrip Books, Penrose Field Guide: 1-77 pag.
- Siebe, C.; Abrams, M. y Macías, J.L. 1995. Derrumbes Gigantes, Depósitos de Avalancha de Escombros y Edad del Actual Cono del Volcán Popocatepetl. En: Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Secretaria de Gobernación y Centro Nacional de Prevención de

- Desastres (CENAPRED). *Volcán Popocatépetl. Estudios realizados durante la crisis 1994-1995*. CENAPRED. Mexico D.F., México. 195-220 pag.
- Simkin, T. y Siebert, L. 1994. *Volcanoes of the World*. Geoscience Press & Smithsonian Institution Global Volcanism Program. Tucson AZ, USA. 368 pag.
- SMEC International Pty Ltd 1999. Rebuilding Rabau. Report to Government of Papua New Guinea, Gazelle Restoration Authority. SMEC International Pty Ltd (Singapore Branch). Singapore. 19 pag.
- Spark, R.J.S. 2003. *Forecasting volcanic eruptions*. Earth and Planetary Science Letters, 210: 1-15 pag.
- Sparks, R.S.J. & Aspinall, W.P. 2004. Volcanic Activity: Frontiers and Challenges in Forecasting, Prediction and Risk Assessment: 359-373 pag. In: American Geophysical Union. *The State of the Planet: Frontiers and Challenges in Geophysics. Geophysical Monograph 150*. Proceeding from the IUGG General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics, June 30, 2003. Sapporo, Japon. 416.
- Tarraga, M. 2007. *Análisis dinámicos de series sismovolcánicas. Estudios de los volcanes Villarrica, Tunguraua, Stromboli y Teide*. Tesis doctoral. Departamento de Física de la Tierra, Astronomía y Astrofísica I. Facultad de C. Físicas, Universidad Complutense. Madrid, España. 192 pag.
- Tarraga, M.; Carniel, R.; Ortiz, R.; Marrero J.M. & García, A. 1976. *On the predictability of volcano-tectonic events by low frequency seismic noise analysis at Teide-Pico Viejo volcanic complex, Canary Islands*. Natural Hazards and Earth System Sciences, 6: 365-376 pag.
- R, 2008: The R Foundation for Statistical Computing, R version 2.7.0, 2008
- Tomblin, J. 1982. Managing volcanic emergencies. United Nations. UN. Office of the United Nations Disaster Relief Co-Ordinator. New York, USA. 10 pag.
- Tomblin, J.F. & Michael, M.O. 1978. Nuée Ardente Hazard in the Lesser Antilles. Comunicación personal. University of West Indies. Trinidad. 23 pag.
- UE Rapid Press Released 2009. Un enfoque comunitario para la prevención de catástrofes naturales y de origen humano en la UE. UE Rapid Press Released (<http://europa.eu/rapid/>). Bruselas, Bélgica. 23 de enero.
- Valdés-González, C.; De la Cruz Reyna, S.; Martínez-Bringas, A.; Quass, R. y Guevara-Ortiz, E. 2001. Resumen de la actividad del volcán Popocatépetl, diciembre 1994 a Mayo 2001. En: Centro Nacional de Prevención de Desastres, Secretaría de la Gobernación, Instituto de Geofísica. *Las cenizas volcánicas del Popocatépetl y sus efectos para la aeronavegación e infraestructuras aeroportuaria*. CENAPRED. México D.F., México. 21-42 pag.
- Vidal, R.; Ortiz, I. y Alvarez, R. 1995. Población expuesta a desastre en las proximidades del volcán Popocatépetl. En: Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Secretaria de Gobernación y Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). *Volcán Popocatépetl. Estudios realizados durante la crisis 1994-1995*. CENAPRED. México D.F., México. 99-108 pag.
- Voight, B. 1988. *A method for prediction of volcanic eruptions*. Nature, 332, 10: 125-130 pag.
- Voight, B. 1990. *The 1985 Nevado del Ruiz volcano catastrophe: anatomy and retrospection*. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 44: 349-386 pag.
- Wikipedia, The Free Encyclopedia 2009. The Free Encyclopedia. Hurricane Katrina. . pag. http://en.wikipedia.org/wiki/Hurricane_Katrina. .
- Woo, G. 2007. *Probabilistic criteria for volcano evacuation decisions*. Natural Hazards, 45: 87-97 pag.

Modelo de evacuación de escala variable. Una herramienta para la gestión de Crisis Volcánicas

Zuccaro, G.; Cacace, F.; Spence, R.J.S. & Baxter, P.J. 2008. *Impact of explosive eruption scenarios at Vesuvius*. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 178: 416–453 pag.