

Aplicación de un modelo de advección-difusión para dispersión de ceniza volcánica: erupción volcán Hudson (1991), Chile

Juan Parra A.

*Departamento de Ciencias Físicas. Universidad de La Frontera
Avenida Francisco Salazar 01145, Casilla 54-D. Temuco, Chile*

Dante Figueroa M.

*Departamento Física de la Atmósfera y del Océano, Universidad de Concepción
Casilla 4009, Concepción, Chile*

Recibido el 22 de septiembre de 1998; aceptado el 18 de mayo de 1999

Con el propósito de estimar los espesores de ceniza volcánica que se depositan a nivel del suelo, un modelo numérico del tipo advección-difusión es aplicado a la segunda fase eruptiva del volcán Hudson ($45^{\circ}54'S-72^{\circ}58'W$), Chile, ocurrida el 12 de agosto de 1991. La erupción de carácter pliniana provino de un cráter de 800 m de diámetro, produciendo columnas de gases y cenizas que alcanzaron 18 Km de altura. La aplicación del modelo, el que considera procesos de advección horizontal, difusión turbulenta, deposición vertical y la morfología del terreno, permite obtener la distribución espacial de las isópacas, las que comparativamente presentan una disposición muy similar a las observadas. Los resultados obtenidos indican un error relativo porcentual que varía desde un 6% para espesores de ceniza del orden de 150 cm hasta alrededor del 30% para espesores de ceniza de 10 cm.

Descriptores: erupción; isópacas; volcán Hudson; advección horizontal; difusión turbulenta

To be able to estimate the thicknesses of the volcanic ash which is deposited at the ground level, a numerical model of advection-diffusion type is applied to the second eruptive phase of the Hudson volcano ($45^{\circ}54'S-72^{\circ}58'W$), Chile, initiated August 12, 1991. The eruption of plinian character came from a crater of 800 m of diameter, producing columns of gases and ashes which reached a heights up to 18 Km. The application of a model which considers processes of horizontal advection, turbulent diffusion, vertical deposition and the topography of the ground allows us to obtain the spatial distribution of the isopachs which comparatively presents a similar disposition to those observed. The results obtained indicate a porcentual relative error which vary from a 6% for ash thicknesses of about 150 cm to about a 30% for ash thicknesses of 10 cm.

Keywords: eruption; isopachs; Hudson volcano; horizontal advection; turbulent diffusion

PACS: 91.40.Bp; 91.40.Dr; 91.40.Ft

1. Introducción

Para las cuencas u hoyas hidrográficas los volcanes se configuran en un componente ecosistémico, caracterizados no sólo por su imponente belleza sino además por constituirse en importante fuente de recursos. No obstante, cuando entran en erupción se transforman bruscamente en un peligro natural, cuya intensidad y dinámica son capaces de modificar y transformar el entorno físico a escalas de tiempo de los minutos, horas o semanas y generar además grandes pérdidas económicas y de vidas humanas.

De todos los productos liberados durante una erupción volcánica, Scott [1] reconoce en la ceniza volcánica el peligro de mayor alcance, capaz de cubrir grandes extensiones de terreno y afectar como es de esperar a ecosistemas terrestres y acuáticos, incluido el hombre. Así por ejemplo, se estima que durante la última erupción estromboliana del volcán Lonquimay ($38^{\circ}22'S-71^{\circ}35'W$), Andes del Sur, Chile, iniciada el 25 de diciembre de 1988 y cuyo ciclo eruptivo tuvo una duración de trece meses, las precipitaciones de material par-

ticulado afectaron alrededor de cien mil hectáreas de bosques y praderas, y unas diez mil personas sufrieron algún tipo de alteración en su salud [2].

Considerando que las erupciones volcánicas se constituyen en un desastre natural derivado de la propia variabilidad de la naturaleza, en consecuencia inevitables desde el punto de vista de su ocurrencia, la defensa contra sus efectos descansa en la adecuada utilización de instrumentos de gestión orientados a mitigar en parte las externalidades generadas. En este sentido, la confección de mapas de zonificación de peligro, asistida por la modelación numérica de procesos volcánicos, pueden ser de eficaz ayuda para proveer los lineamientos básicos en la planificación de largo alcance del territorio en los alrededores del volcán, así como en la identificación de áreas que deberían ser evacuadas y evitadas durante las erupciones.

En esta línea de orientación y con el propósito de estimar los espesores de ceniza depositados a nivel del suelo, se aplica un modelo numérico del tipo advección-difusión a la segunda fase eruptiva del volcán Hudson, Chile. Básicamente,

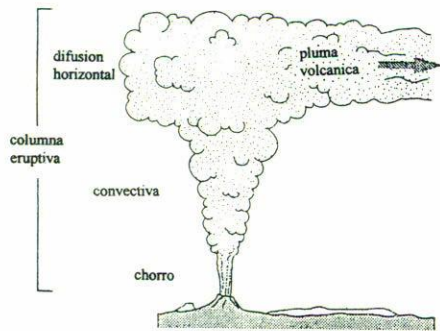


FIGURA 1. Estratificación columna eruptiva.

una ecuación de continuidad es resuelta por la técnica de diferencias finitas, sobre una grilla tridimensional no uniforme, con resoluciones horizontal, vertical y temporal de 2.5 Km, 500 m y 15 seg, respectivamente.

2. Dinámica columna eruptiva

La emisión de gases y ceniza es quizás una de las características más espectaculares de las erupciones volcánicas. Las partículas al ser eyectadas del cráter son transportadas hacia arriba por medio del establecimiento de una columna eruptiva, cuya formación es controlada por la expansión del vapor de agua, inicialmente sometido a altas temperaturas, hasta condiciones atmosféricas [3].

Sobre la base de aspectos teóricos y antecedentes empíricos [4, 5], dentro de la columna eruptiva y de acuerdo a la ilustración de la Fig. 1, se evidencian tres regiones claramente diferenciadas: zona de chorro, zona convectiva y la zona de difusión horizontal. La zona de chorro corresponde a la parte basal de la columna, caracterizándose por ser una región donde la expansión de los gases acelera la mezcla de éstos con materiales piroclásticos. Esta zona ocupa una pequeña fracción de la altura total de la columna, desde pocos centenas de metros hasta algunos kilómetros en las erupciones más violentas. Posteriormente, se pasa a la zona convectiva, caracterizada por la conversión de energía térmica de la mezcla gases/ceniza a energía potencial y cinética durante la entrada de aire atmosférico. El aire atrapado durante el levantamiento de la columna, se expande debido al calentamiento que experimenta, disminuyendo la densidad efectiva de la columna y causando finalmente la flotabilidad del material. El techo de la zona convectiva se define por un nivel, donde la columna eruptiva tiene la misma densidad y temperatura que la atmósfera que la envuelve [6, 7]. Por encima de este nivel, la columna continúa su ascenso debido a su impulso, hasta que alcanza una altura en la que se expande horizontalmente formando la zona de difusión horizontal, la cual queda sometida a la interacción con los vientos de altura, desarrollándose la denominada pluma volcánica. En general, una vez que las partículas abandonan la columna, el tiempo de permanencia en la atmósfera está condicionado por la velocidad terminal de caída, dependiente a su vez de las características

geométricas de las partículas y condiciones atmosféricas. En casos extremos, para partículas muy pequeñas que han sido arrastradas a grandes alturas, estos tiempos pueden ser extremadamente largos e incluso de varios años en la estratosfera.

3. Modelo numérico advección-difusión

Considerando que los principales factores que gobiernan la dispersión y posterior deposición de la ceniza volcánica se resumen en procesos de difusión turbulenta, advección por el viento y gravitatorios, la variabilidad espacio temporal de la concentración de partículas $C(x, y, z, t)$ en la atmósfera es descrita por la ecuación de continuidad [8]

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + \frac{\partial(V_s C)}{\partial z} = K_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} + S, \quad (1)$$

donde

$$K_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \quad (2)$$

es el término de difusión; K_x, K_y, K_z son los coeficientes de difusión turbulenta en las direcciones x, y, z .

$$u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} \quad (3)$$

es el término de advección, debido al campo de viento horizontal de componentes u, v ;

$$\frac{\partial(V_s C)}{\partial z} = V_s \frac{\partial C}{\partial z} + C \frac{\partial V_s}{\partial z} \quad (4)$$

es un término de deposición; $V_s(z)$ velocidad terminal de caída de las partículas eruptadas. Un algoritmo propuesto por Armienti *et al.* [9] en el intervalo de 0-30 Km permite calcular a V_s como

$$V_s(z) = V_s(z = z_{\min})e^{0.024z}, \quad (5)$$

donde z es la altura de caída expresada en Km y $V_s(z = z_{\min})$ es la velocidad terminal de caída de las partículas a nivel del mar. Finalmente, la función S representa la fuente de material particulado, y describe la evolución temporal de la concentración de partículas que ingresan a la atmósfera.

De todas las variables de la Ec. (1), S es uno de los parámetros más complejos de representar. Dado que, en general, no es posible medir directamente esta fuente, deben buscarse modos de parametrizarla a través de variables más fáciles de cuantificar directamente. Una de las fórmulas empíricas propuestas corresponde a la de Suzuki [10]:

$$S(x, y, z, t) = Q(t) \frac{A^2(1 - z/H)e^{A[z/(H-1)]}}{H[1 - (1 + A)e^{-A}]} f(x, y), \quad (6)$$

donde $Q(t)$ es la masa de las partículas eruptadas por unidad de tiempo; $H(t)$ la altura máxima alcanzada por la columna; A un parámetro adimensional mayor que la unidad,

que determina la posición de máxima concentración de las partículas en la columna y $f(x, y)$ una función relacionada con la distribución horizontal de las partículas en la columna, siendo descrita por

$$f(x, y) = \frac{1}{\pi r^2(z)} = \frac{1}{\pi(x^2 + y^2)} \quad (7)$$

con $r(z) = r_0 + z/8$ [11], r_0 radio del cráter. La resolución numérica de la Ec. (1) es realizada por la aplicación de la técnica de diferencias finitas a cada uno de los términos contenidos en la ecuación diferencial [12, 13]. Para tal efecto, se considera una grilla tridimensional, no uniforme, de coordenadas:

$$\begin{aligned} &x_1, \dots, x_i, \dots, x_{n_x} \\ &y_1, \dots, y_j, \dots, y_{n_y} \\ &z_1, \dots, z_k, \dots, z_{n_z}, \end{aligned}$$

con

$$\begin{aligned} x_i &= x_{i-1} + Dx_{i-1}, \\ y_j &= y_{j-1} + Dy_{j-1}, \\ z_k &= z_{k-1} + Dz_{k-1}, \end{aligned}$$

donde $Dx_i, Dy_j, Dz_k; i = 1, \dots, n_x, j = 1, \dots, n_y, k = 1, \dots, n_z$ son los pasos espaciales (horizontal y vertical) y temporal han sido considerados iguales a 2.5 Km, 500 m y 15 seg, respectivamente.

Bajo la adopción de condiciones iniciales y de contorno:

$$\begin{aligned} C(x, y, z, t = t_{\min}) &= 0 \\ C(x = x_{\min}, y, z, t) &= C(x = x_{\max}, y, z, t) = 0 \\ C(x, y = y_{\min}, z, t) &= C(x, y = y_{\max}, z, t) = 0 \\ C(x, y, z = z_{\max}, t) &= 0 \\ \frac{\partial C}{\partial z} \Big|_{z=z_{\min}} &= \text{constante} \end{aligned}$$

La solución general de la Eq. (1) en el tiempo $t + Dt$, es encontrada por

$$C_{i,j,k}^{n+1} = C_{i,j,k}^n + \text{difusión} + \text{advección} + \text{deposición} + \text{fuente}$$

donde $C_{i,j,k}^n, C_{i,j,k}^{n+1}$ corresponden a la concentración de ceniza en un nodo de la grilla, de coordenadas x_i, y_j, z_k en el tiempo t y $t + Dt$, respectivamente, donde Dt es el paso temporal.

Integrada la ecuación (1) la distribución horizontal de los espesores de ceniza depositados a nivel del suelo, desde el comienzo de la erupción hasta cualquier tiempo t , se obtiene integrando

$$\frac{\xi}{\rho_p} \int_{t_{\min}}^t V_s(z = z_{\min}) C(x, y, z = z_{\min}, t) dt \quad (8)$$

donde ρ_p corresponde a la densidad de las partículas; ξ es un factor adimensional, que corrige los espesores de ceniza por efecto introducido por la topografía del terreno. Este último, es descrito por la ecuación

$$\frac{\sin(\beta + \alpha)}{\sin \beta}, \quad (9)$$

donde α corresponde a la pendiente del terreno y β a la dirección de impacto de las partículas en $z = z_{\min}$;

$$\beta = \arctan \frac{V_s(z_{\min})}{V_w(z_{\min})} \quad (10)$$

$V_w(z_{\min})$ corresponde a la velocidad del viento a nivel del mar.

Las Ecs. (1) y (8) son resueltas para partículas con la misma velocidad terminal de caída. Los espesores totales se obtienen sumando las contribuciones de las diferentes partículas

$$\sum \frac{\xi}{\rho_p} \int_{t_{\min}}^t V_s(z = z_{\min}) C(x, y, z = z_{\min}, t) dt \quad (11)$$

4. Erupción del volcán Hudson

El Hudson es el volcán más meridional de la zona volcánica de los Andes del Sur, Chile. Su estructura corresponde a una caldera, casi circular, de unos 10 Km de diámetro este-oeste, siendo bien definidos sólo sus bordes occidental y sur, con alturas máximas de 1746 y de 1905 m.s.n.m. Después de un período de veinte años de aparente inactividad, el volcán Hudson inició un nuevo ciclo eruptivo el 8 de agosto de 1991. La erupción se constituyó en una de las más grandes ocurridas en Chile durante este siglo, siendo sólo la erupción del volcán Quizapu en 1932 la de mayor magnitud.

La erupción tuvo dos etapas que tuvieron lugar en el borde y dentro de la caldera. La segunda fase explosiva iniciada el 12 de agosto de 1991, más intensa que la primera, se produjo desde un cráter de 800 m de diámetro, generando una extensa pluma hacia el sureste, de lapilli y ceniza pumícea. El área cubierta por la deposición de ceniza, se estima en unos 150 000 Km², distribuida entre territorio chileno y argentino. Debido a las condiciones semiáridas de la zona afectada, el fenómeno tuvo graves consecuencias en cuanto al sepultamiento de arbustos y pastizales; irritación a la vista, sistema respiratorio y piel de la población humana; obstrucción de ríos y desagües de lagos; desplome de viviendas; inutilización de aeródromos, entre otros [14].

4.1. Caracterización partículas eruptadas

Para la segunda fase explosiva del volcán Hudson la distribución de tamaño de las partículas se conoce parcialmente y en forma aislada. Para remediar esta situación, se han utilizado medidas empíricas comunicadas por Wilson y Huang [15] en el intervalo de 62 a 1000 μm , y que se refieren a tamaño, densidad y velocidad terminal de caída. Siguiendo la metodología propuesta por Armienti *et al.* [9], los diferentes cons-

TABLA I. Distribución de tamaño, densidad y velocidad terminal de partículas.

Clase	diámetro (μm)	densidad (gr/cc)	Velocidad terminal (cm/s)
500–1000 μm	639.08	0.80	114.1
250–500 μm	353.56	0.99	106.6
125–250 μm	189.90	1.51	73.3
125–62 μm	97.76	1.94	35.1

tituyentes fueron agrupados por clases. En la Tabla I se indica un resumen de los datos obtenidos, donde se consigna por clase: diámetro, densidad y velocidad terminal de caída de las partículas a nivel del mar.

4.2. Coeficientes de difusión

Para tomar en cuenta la anisotropía causada por la gravedad se han considerado los coeficientes de difusión K_x , K_y , K_z . Los dos primeros están vinculados al transporte de material en el plano horizontal y el último a la dirección vertical. Aunque en estricto rigor, estos coeficientes son dependientes de las condiciones atmosféricas, en consecuencia pueden experimentar variabilidad espacial y temporal, la literatura reporta valores constantes [9, 16]. En efecto, para plumas provenientes de erupciones plinianas con escalas horizontales sobre los 100 kilómetros, se han utilizado valores de K_x , K_y en el intervalo de 3000–5000 m^2/s y $K_z = 45 \text{ m}^2/\text{s}$.

Para la erupción del Hudson, donde la escala horizontal involucrada es de algunos cientos de kilómetros, y con el propósito de permitir una mejor reproducción de los espesores de ceniza medidos en terreno, se han realizado un conjunto de simulaciones con coeficientes de difusión K_x , K_y en el intervalo de 2000 a 5000 m^2/s y K_z de 45 m^2/s .

4.3. Término fuente

Según la Ec. (6) la evaluación del término fuente requiere del conocimiento de la altura máxima alcanzada por la columna, tasa de emisión, radio del cráter y del parámetro A . Considerando la naturaleza pliniana de la fase eruptiva, con una duración de 72 horas e índices de explosividad estimados de 3 a 4, y con el propósito de encontrar una representación analítica para la evolución temporal de altura para la columna eruptiva, un ajuste polinomial ha sido aplicado a los datos comunicados por Naranjo *et al.* [14] (véase Fig. 2).

Por su parte, la tasa de emisión es un variable que no ha sido medida *in situ*. No obstante, un algoritmo propuesto por Settle [17] permite su estimación semiempírica:

$$Q(\text{gr/s}) = \left(\frac{H(\text{Km})}{0.117} \right)^{4.54} \quad (12)$$

Finalmente, y a diferencia de las variables anteriores, la cantidad A resulta de difícil determinación empírica. En principio,

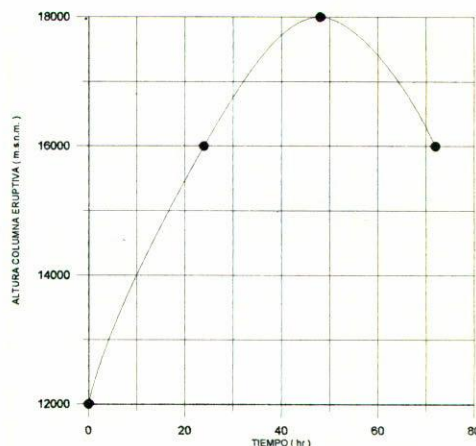


FIGURA 2. Variabilidad temporal altura de columna eruptiva. Segunda fase explosiva erupción volcán Hudson.

puede tomar un espectro de valores mayores que la unidad, dependiendo del tamaño, densidad y de la velocidad con que emergen las partículas de la zona de chorro en la columna eruptiva. Al igual que los coeficientes de difusión, se ha procedido a optimizar el valor de A en el intervalo de 1.5 a 4.2.

4.4. Campo de viento

A partir de radiosondeos editados en media diaria por la Dirección Meteorológica de Chile [18], se ha procedido a registrar el perfil de velocidad del viento en altura, coincidente con el mes y año de la erupción. Sobre los datos, ajustes lineales, con coeficientes de correlación de 0.991 y 0.995 fueron obtenidos

$$V(z) = 0.00237z + 0.652 \quad z \leq 11.24 \times 10^3 \text{ m}, \quad (13)$$

$$V(z) = -0.000688z + 35.03 \quad 11.24 \times 10^3 \leq z \leq 16.1 \times 10^3 \text{ m}. \quad (14)$$

Acorde a las observaciones de terreno [14] la dirección del viento se ha ajustado hacia el SE.

4.5. Topografía del terreno

Con el propósito de introducir la topografía en la estimación de los espesores de ceniza, cartas regulares fueron digitalizadas a escala 1:250 000 correspondientes a los sectores de Coihaique y Chile Chico, ambos ubicados en la región Sur del territorio nacional. De acuerdo a la Fig. 3 el ingreso de los datos en formato vectorial al programa SURFER, permitió la elaboración de un modelo digital de elevación, con una grilla de espaciamientos regulares entre nodo y nodo de 2.5 Km. Seguidamente, con la aplicación de un algoritmo de diferencia central cálculos de pendiente del terreno fueron realizados a cada nodo de la grilla.

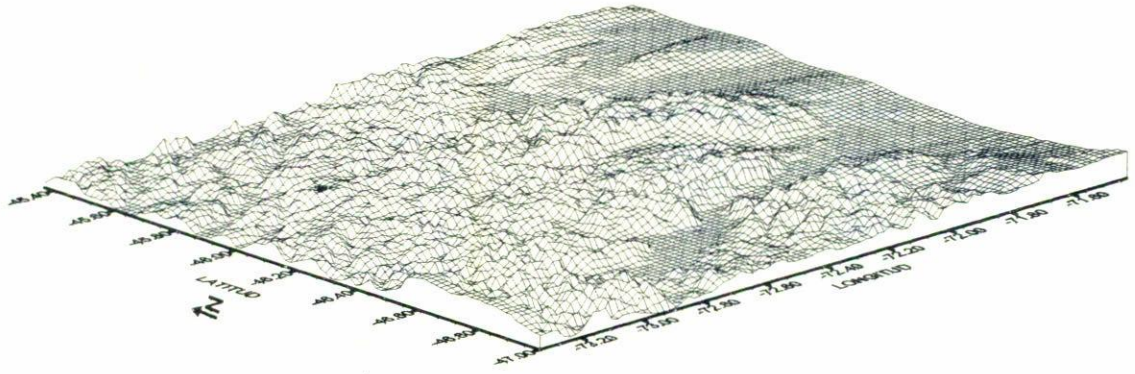
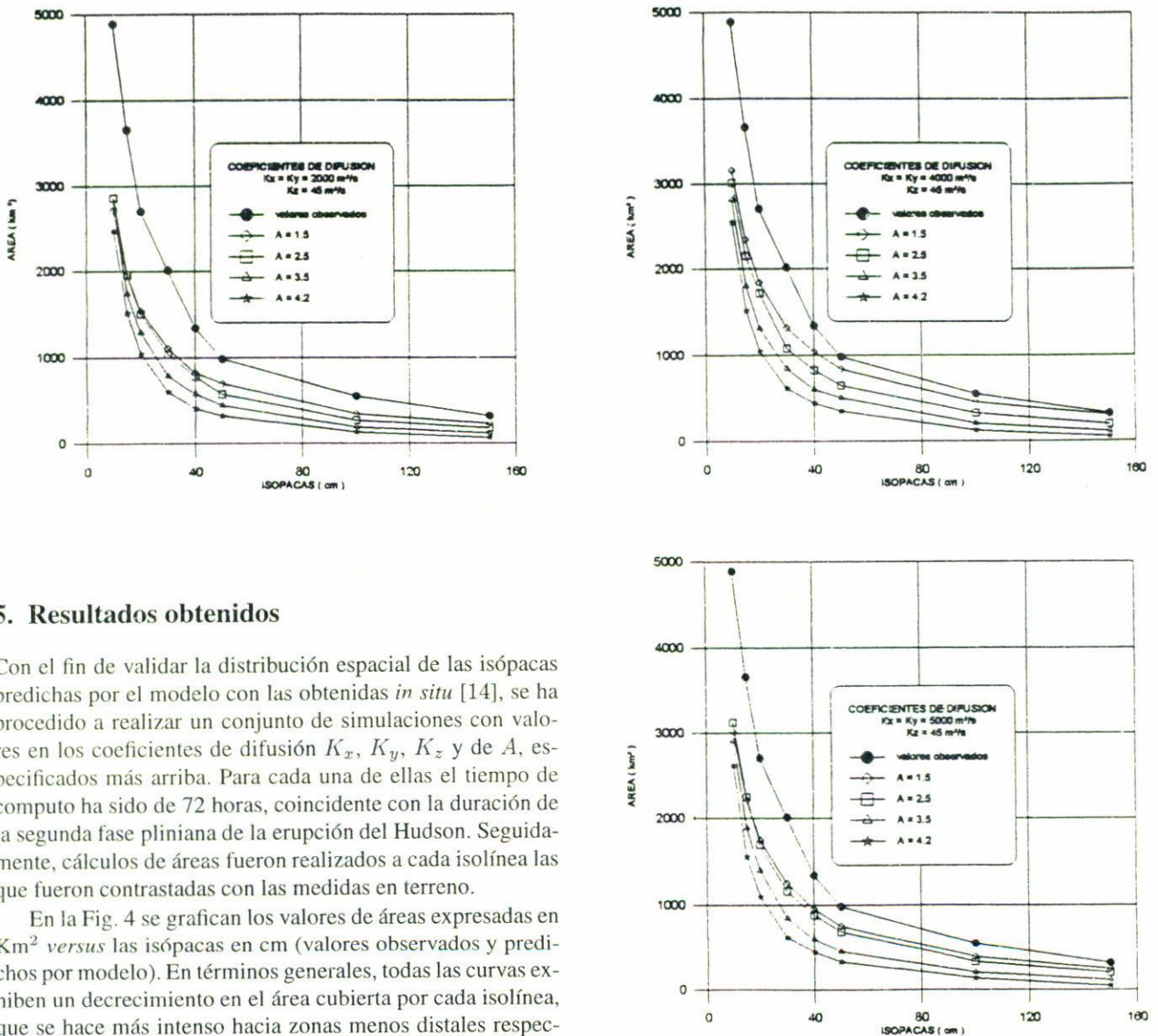


FIGURA 3. Modelo digital de elevación. Sector Coihaique y Chile Chico, Chile. ▲ Volcán Hudson.



5. Resultados obtenidos

Con el fin de validar la distribución espacial de las isópacas predichas por el modelo con las obtenidas *in situ* [14], se ha procedido a realizar un conjunto de simulaciones con valores en los coeficientes de difusión K_x , K_y , K_z y de A , especificados más arriba. Para cada una de ellas el tiempo de computo ha sido de 72 horas, coincidente con la duración de la segunda fase pliniana de la erupción del Hudson. Seguidamente, cálculos de áreas fueron realizados a cada isolinéa las que fueron contrastadas con las medidas en terreno.

En la Fig. 4 se grafican los valores de áreas expresadas en Km^2 versus las isópacas en cm (valores observados y predichos por modelo). En términos generales, todas las curvas exhiben un decrecimiento en el área cubierta por cada isolinéa, que se hace más intenso hacia zonas menos distales respecto del centro de emisión. Al comparar las observaciones de terreno con las predichas por el modelo se obtiene el mejor ajuste al utilizar $K_x = K_y = 4000 m^2/s$ y $A = 1.5$. En este

FIGURA 4. Distribución areal de isópacas. Valores observados y calculados.

caso, junto con la obtención de distribuciones espaciales similares a las observadas, el error relativo porcentual varía desde un 6% para espesores de ceniza del orden de 150 cm hasta alrededor del 30% para espesores de ceniza de 10 cm.

6. Conclusiones

De acuerdo a los resultados obtenidos, el modelo numérico predice en forma satisfactoria la distribución horizontal de los espesores de ceniza depositados a nivel del suelo. Particularmente, lo anterior se hace evidente para distancias relativas al cráter menores a los 80 Km. Respecto de las discrepancias observadas, éstas se pueden atribuir entre otros factores, a la suposición de que el perfil de viento es sólo dependiente

de la altura, permaneciendo constante en el plano horizontal. Además, al considerar que los coeficientes de difusión horizontal y vertical toman independencia tanto espacial como temporal. No obstante lo anterior, la presente contribución muestra la factibilidad de elaboración y aplicación de estos tipos de modelos y su posterior utilidad en la generación de cartografía de peligro volcánico.

Agradecimientos

J.C. Parra agradece el apoyo prestado por la Dirección de Investigación de la Universidad de Concepción en el marco del proyecto de investigación No. 97.310.024-6.

-
1. W. Scott, *Los peligros volcánicos*, World Organization of volcano observatories, (1993)
 2. O. González-Ferrán, P. Baker y P. Acevedo, *Revista Geofísica* **31** (1989) 107.
 3. J. Molist y F. Colombo, *Riesgo volcánico*, Serie Casa de los Volcanes, Madrid (1995)
 4. L. Wilson, R. Sparks, T. Huang, and N. Watkins, *J. Geophys. Res.* **B4** (1978) 1829.
 5. R. Sparks, *Bull. Volcanol.* **48** (1986) 3.
 6. L. Wilson and P. Walker, *Geophys. J.R. Soc.* **89** (1987) 657.
 7. A. Woods, *Bull. Volcanol.* **50** (1988) 169.
 8. F. Pasquill, *Atmospheric diffusion*, (Van Nostrand Reinhold, New York, 1971).
 9. P. Armienti, G. Macedonio, and M. Pareschi, *J. Geophys. Res.* **B6** (1988) 6463.
 10. T. Suzuki, *Physics and Tectonics*, (Terra Scientific, Tokio, 1983).
 11. L. Wilson, *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.* **45** (1976) 543.
 12. M. Abramowitz and I. Stegun, *Handbook of mathematical functions*, (Dover publications, Inc, New York, 1972).
 13. P. Smolarkiewicz, *Monthly Weather Rev.* **111** (1983) 479.
 14. J. Naranjo, H. Moreno y N. Banks, *Informe técnico Sernageomin* **44** (1993) 50.
 15. L. Wilson and T. Huang, *Earth Planet. Sc. Lett.* **44** (1979) 311.
 16. G. Macedonio, M. Pareschi, and R. Santacroce, *J. Geophys. Res.* **B12** (1988) 14817.
 17. M. Settle, *J. Volcanol. Geotherm. Res.* **3** (1978) 309.
 18. Dirección Meteorológica de Chile, *Anuario meteorológico*, Santiago de Chile (1991).