

ACTIVIDAD ERUPTIVA Y CAMBIOS GLACIARES EN EL VOLCÁN POPOCATÉPETL, MÉXICO

Julio-Miranda, P.¹; Delgado-Granados, H.²; Huggel, C.³ y Käab, A.⁴

RESUMEN

El presente trabajo, se centra en el estudio del impacto de la actividad eruptiva del volcán Popocatépetl en el área glaciar durante el período 1994-2001. Para determinar el efecto de la actividad eruptiva en el régimen glaciar, se realizaron balances de masa empleando técnicas fotogramétricas, mediante la generación de modelos digitales de elevación (MDE). La comparación de MDEs permitió establecer los cambios glaciares en términos de área y volumen tanto temporales como espaciales. Así mismo, los cambios morfológicos del área glaciar fueron determinados con base en la fotointerpretación, de manera que los datos obtenidos por este procedimiento y los obtenidos mediante la comparación de los MDE se relacionaron con la actividad eruptiva a lo largo del periodo de estudio, estableciendo así la relación entre los fenómenos volcánicos y los cambios glaciares. Los resultados estimados del balance de masa del área glaciar y los cambios morfológicos observados a lo largo de 1994-2001 en el volcán Popocatépetl, permiten establecer que la actividad eruptiva aceleró el proceso de retroceso glaciar que tenía lugar desde principios del siglo XX y que culminó con la fragmentación del área glaciar.

Palabras clave: volcán Popocatépetl, interacción actividad eruptiva-glaciares, fotogrametría digital, retroceso glaciar.

ERUPTIVE ACTIVITY AND GLACIER CHANGES AT POPOCATEPETL VOLCANO, MEXICO

ABSTRACT

The aim of the present work is the study of the eruptive activity-glacier interaction and, the effects on glacier evolution over 1994-2001. The glacial regime, morphological changes and influence of the eruptive processes were determined in order to establish the eruptive activity-glacier interaction. Mass balances were carried out by means of photogrammetric techniques in order to determine the influence of eruptive activity on the glacial regime. DEM comparisons allowed establishing spatial and temporal changes of area and volume of the glacier. Morphological changes were determined by photointerpretation, so the data obtained by this procedure and the data derived from DTM comparison were correlated to eruptive activity. The mass balance, and morphological changes at Popocatépetl volcano over 1994-2001 suggest that the eruptive activity accelerated the glacial retreat and cause its fragmentation.

Keywords: Popocatépetl Volcano, volcano-ice interactions, digital photogrammetry, glacial retreat.

¹Cuerpo Académico de Ciencias Sociales, Coordinación de Ciencias Sociales y Humanidades, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Av. Industrias 101-A, Frac. Talleres 78494, SLP, México. Tel. +5244 48182475.e-mail: patricia.julio@uaslp.mx

²Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México C.U., Coyoacán, 04510, México DF, México. e-mail: hugo@geofisica.unam.mx

³Glaciology and Geomorphodynamics Group, Department of Geography, University of Zurich, Winterthurerstr. 190, 8057 Zurich, Switzerland. e-mail: chuggel@unizh.ch

⁴Department of Geosciences, University of Oslo, Postbox 1047 Blindern, 0316 Oslo. e-mail: andreas.kaab@geo.uio.no

INTRODUCCIÓN

Los glaciares son indicadores sensibles a los cambios climáticos (Haerberli et al. 2001). El cambio en la masa de un glaciar es la respuesta directa e inmediata a estos cambios, en tanto que el cambio de su longitud es una reacción indirecta y retardada. Sin embargo, existen otros factores que pueden alterar la dinámica glaciar y que han sido poco estudiados. La actividad eruptiva es uno de ellos. Erupciones ocurridas en volcanes cubiertos por glaciares han permitido documentar los cambios que la actividad eruptiva produce en los glaciares así como los peligros derivados de la interacción entre volcanes y glaciares, ejemplos de este tipo de estudios son los realizados por Benson y Follet (1986), Sturm, et al. (1986), Brugman y Meier (1981), Driedger (1981), Waitt et al. (1983), Pierson et al. (1990), Thouret (1990) y Manville, et al. (2000). A pesar de los notables avances en el estudio de la interacción entre la actividad eruptiva y los glaciares aún existen numerosas interrogantes, tales como el tipo de procesos térmicos y mecánicos que se producen en la interfase nieve y piroclastos (Walder, 2000) o si una erupción puede ser disparada por el aumento de carga debido a la acumulación de nieve estacional (Lara, 2004).

Los glaciares de México se localizan en las tres montañas de mayor altitud: Citlaltépetl (5,675 m.s.n.m.), Popocatepetl (5,452 m.s.n.m.) e Iztaccíhuatl (5,282 m.s.n.m.) aproximadamente a los 19° norte. Los glaciares de estas

montañas son únicos en esta latitud, lo que resulta relevante en términos de la información climática regional que podría obtenerse de su estudio sistemático (Delgado-Granados, 1997). Estos glaciares se encuentran dentro de la zona intertropical y deben su existencia a factores como latitud, altitud, orientación y topografía. Los glaciares mexicanos han sido estudiados previamente por Weitzberg (1923), White (1954), Lorenzo (1964) White (1981), Delgado-Granados et al. (1986), Delgado-Granados (1986), Palacios (1996), Delgado-Granados (1997), Palacios et al. (1998) y Huggel y Delgado-Granados (2000). El primer inventario glaciar fue realizado por Lorenzo (1964) quien estimó para el Popocatepetl un área glaciar total de 720,000 m² e identificó tres glaciares: Glaciar Norte (GN), Glaciar del Ventorrillo (GV) y Glaciar Noroccidental (GNO). Posteriormente, Delgado-Granados y colaboradores (1986) identificaron sólo dos glaciares, al considerar que el GN y GV constituían uno, debido a que compartían la misma zona de acumulación y drenaje. El GNO lo clasificaron como un glaciarete en estado estacionario y prácticamente muerto. Reportaron por primera vez áreas cubiertas por suelos permanentemente congelados, cuya parte superficial durante la época de ablación se fundía (5 cm) dando origen a procesos de solifluxión. Las zonas de acumulación y ablación no presentan una delimitación clara debido al reducido tamaño del área glaciar. Las temperaturas medidas en la superficie del glaciar en años anteriores a 1994, variaron entre -1.5 a 0.5 °C, (Delgado-Granados, datos sin publicar) lo que

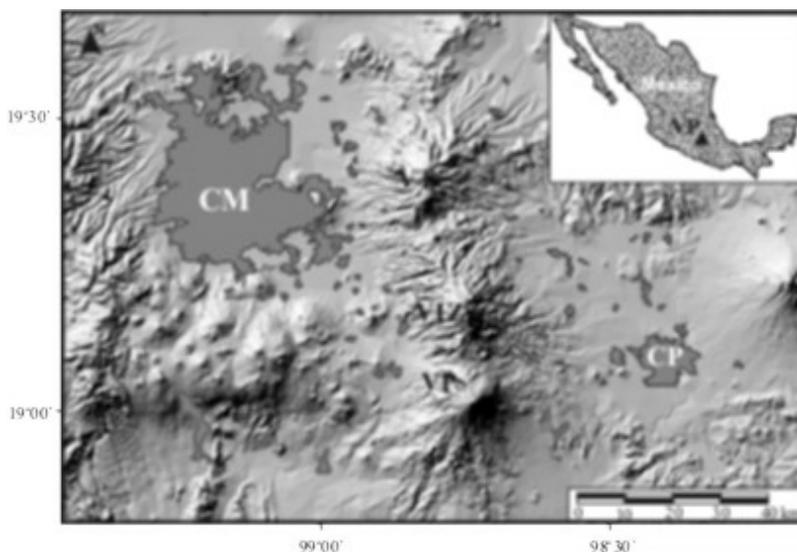


FIGURA 1. El volcán Popocatepetl (VP) se localiza a 60 km al suroeste de la Ciudad de México (CM) y 40 km al noreste de la Ciudad de Puebla (CP) y con los volcanes Tláloc (TV) e Iztaccíhuatl (VIZ) forma la Sierra Nevada.



FIGURA 2. El área glaciár del Popocatépetl en 1997.
Foto: H. Delgado-Granados.

permite considerar al glaciár del Popocatépetl, de manera general, y de acuerdo con la clasificación térmica de los glaciáres, como un glaciár templado.

El volcán Popocatépetl constituye el extremo sur de la Sierra Nevada, la cual forma parte de la Faja Volcánica Transmexicana (FIGURA 1). Es un estratovolcán activo formado por la alternancia de lavas y depósitos piroclásticos de composición andesítica a dacítica. Presenta una morfología casi cónica, excepto por el Ventorrillo, remanente de un volcán ancestral que forma una pared en forma de anfiteatro localizada en el flanco noroeste.

La pendiente promedio del volcán es de 35°. El cráter es elongado y hasta antes de diciembre de 1994, estaba separado del cráter interno por paredes de 200-400 m de altura.

El área glaciár del Popocatépetl estaba albergada en la parte superior de los flancos norte y noroeste del volcán (FIGURA 2). El inicio del período eruptivo actual del Popocatépetl, en diciembre de 1994, brindó la oportunidad de hacer numerosos estudios vulcanológicos y en el caso de los glaciáres, se presentó la oportunidad de estudiar por primera vez en nuestro país, el impacto que

TABLA 1. Cambios del área glaciár del Popocatépetl, 1996-2001

Fecha	Área (m ²)	Período	Área perdida (m ²)	Tasa de pérdida de área (m ² /año)
1996-05-21	426,200			
1997-03-16	401,800	1996-1997	-24,400	26,988
1999-02-02	335,650	1997-1999	-66,150	35,094
2000-01-08	289,250	1999-2000	-46,400	49,666
2001-02-21	203,050	2000-2001	-86,200	81,510

TABLA 2. Balance de masa del área glaciár del Popocatepetl, 1996-2001

Período	Balance de masa (m ³)	Tasa de balance de masa (m ³ /año)
1996-1997	-81,491	-90,545
1997-1999	-1,884,292	-1,002,283
1999-2000	-1,280,639	-1,377,031
2000-2001	31,722	28,368

la actividad eruptiva tendría sobre la dinámica glaciár y los peligros asociados. Después de los primeros reconocimientos sobre la estabilidad del glaciár, en diciembre de 1994, se determinó monitorear el área glaciár, por medio de vuelos y trabajo en campo (Delgado-Granados y Brugman, 1996). Sin embargo, el incremento de la actividad ocasionó que, debido al peligro asociado a la actividad eruptiva, el trabajo de campo se suspendiera. En consecuencia, se planteó el estudio de los glaciares por técnicas remotas y después de considerar diversos métodos, se optó por la fotogrametría digital.

El objetivo del presente estudio es la determinación, mediante el empleo de la fotogrametría digital, de los cambios geométricos y morfológicos del área glaciár del Popocatepetl producidos por la actividad eruptiva durante el período 1996-2001.

METODOLOGÍA

El empleo de la fotogrametría digital para el estudio del área glaciár del Popocatepetl fue factible debido a la disponibilidad de un gran número de fotografías aéreas, tomadas de manera regular desde 1996 con el fin de monitorear la actividad eruptiva del volcán y en particular los cambios que ocurrían en el interior del cráter. Las fotografías aéreas seleccionadas corresponden al 21 de mayo de 1996, 16 de marzo de 1997, 2 de febrero de 1999, 8 de enero de 2000 y 21 de febrero de 2001. El procesamiento de las imágenes se realizó en el Laboratorio de Fotogrametría Digital del Departamento de Geografía Física de la Universidad de Zúrich, Irchel (Suiza). Se empleó el paquete Socet Set V 4.1 LH Systems de Leica para la generación de los respectivos modelos digitales de elevación. Posteriormente, con base en los datos de los MDE se construyeron rejillas con un espaciamiento de 10 m, mediante un método de interpolación de promedio ponderado (Kriging). Una vez obtenidos los nuevos MDE

se aplicó una máscara con el objeto de eliminar todos los datos fuera del área glaciár y poder realizar la resta de modelos para estimar los cambios de área, volumen y los cambios altitudinales de la superficie glaciár.

RESULTADOS

En la FIGURA 3 se puede observar que a lo largo 1996-2001 hubo una pérdida gradual en del área glaciár del Popocatepetl (TABLA 1). La comparación de los datos obtenidos en el presente estudio y los de trabajos previos permiten establecer que, en 38 años (1958-1982) se perdieron 293,800 m², en tanto que en cinco años de actividad eruptiva (1996-2001) se perdieron 223,800 m² de área glaciár.

Los cambios de volumen estimados corresponden al volumen ganado o perdido entre dos fechas subsecuentes (TABLA 2) y representan el balance de masa glaciár durante el período estudiado. En general el balance de masa fue negativo, siendo ente 1999-2000 que ocurre la mayor pérdida de volumen a una tasa de -1,377,031 m³/año. En contraste para el período 2000-2001 se observa un ligero incremento de volumen, que está asociado no a la acumulación de nieve estacional, sino a la acumulación de tefra debido a una fase explosiva ocurrida en diciembre del 2000.

Los cambios altitudinales de la superficie glaciár estimados mediante la resta de los MDE (FIGURA 4) muestran un descenso paulatino. Sin embargo entre 1996-1997 se observa que algunas partes del frente se elevaron.

La actividad eruptiva y su interacción con el área glaciár

El comportamiento eruptivo del Popocatepetl a partir de 1994 se ha caracterizado por una alternancia de eventos explosivos y fases de baja actividad, asociados

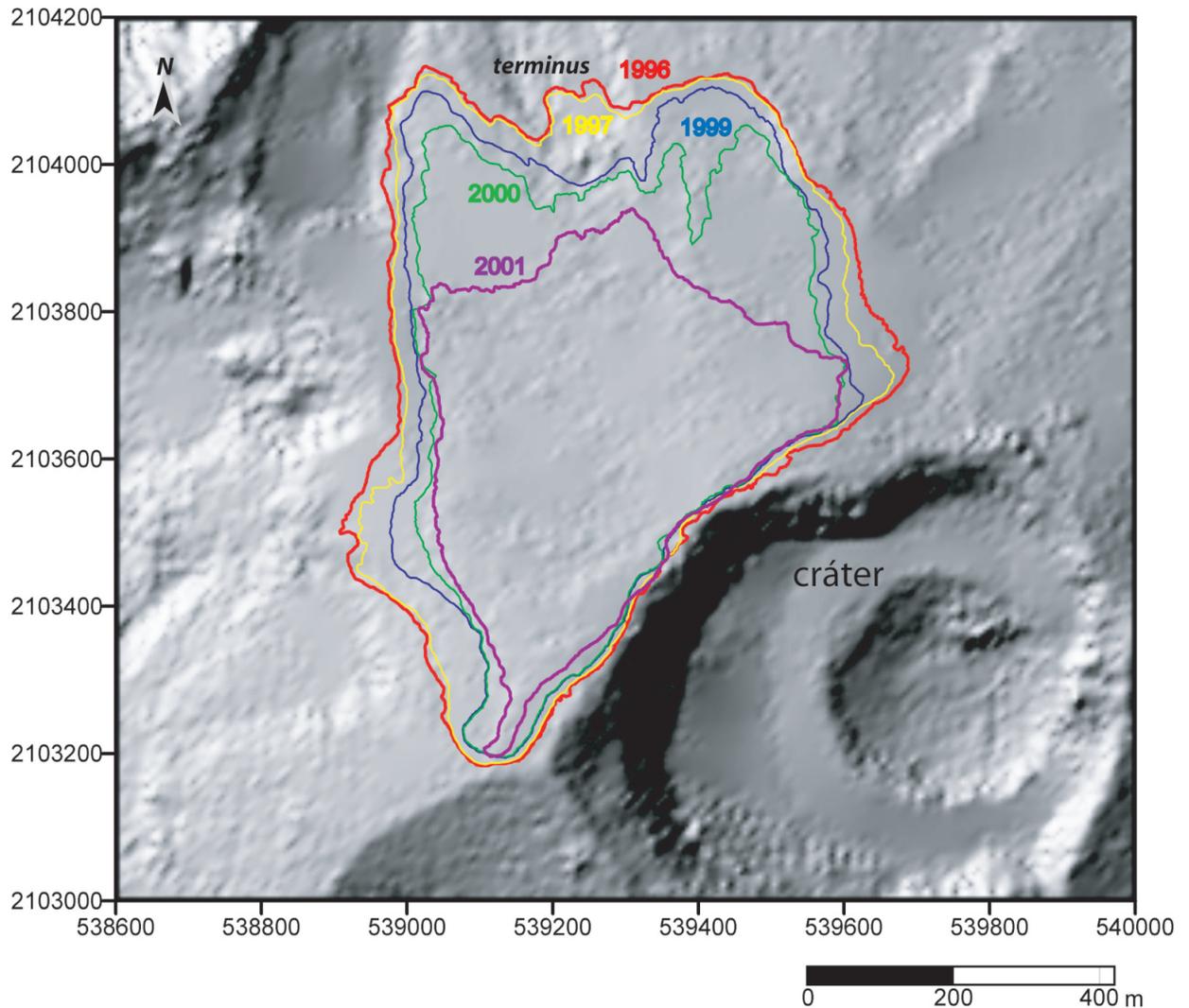


FIGURA 3. Cambios del área glaciaria del Volcán Popocatepetl durante el período 1996-2001. En la parte inferior izquierda se aprecia el cráter y un domo. El modelo sombreado del terreno fue elaborado con base en el modelo digital de elevación correspondiente al 2000.

a diversas fases de construcción-destrucción de domos. Fenómenos como incremento en el flujo de calor, flujos piroclásticos, eyección de material incandescente, pero principalmente la caída de tefra, impactaron de manera considerable la dinámica glaciaria.

Incremento del flujo de calor, en septiembre de 1995 durante el trabajo de campo en el Glaciar del Ventorrillo se observó la presencia de fumarolas en la parte oeste del glaciar. Mediante un barreador infrarrojo se detectó en septiembre de 1997 una anomalía térmica en la misma zona, asociada a la actividad fumarólica previamente

observada. Esta anomalía térmica se presentó durante el crecimiento de un nuevo cuerpo de lava, a mediados de agosto, en el interior del cráter. De lo cual se puede establecer *a priori*, que durante etapas de intensa emisión de lava, el incremento del flujo de calor pudo provocar fusión en la parte basal del glaciar, al favorecer la ablación, contribuyendo al adelgazamiento y deslizamiento glaciario. Este último proceso pudo contribuir al desplazamiento de masa hacia la parte frontal durante el período de 1996-1997 en la que de acuerdo con la comparación de los MDE correspondientes, se observa la elevación del frente glaciario.

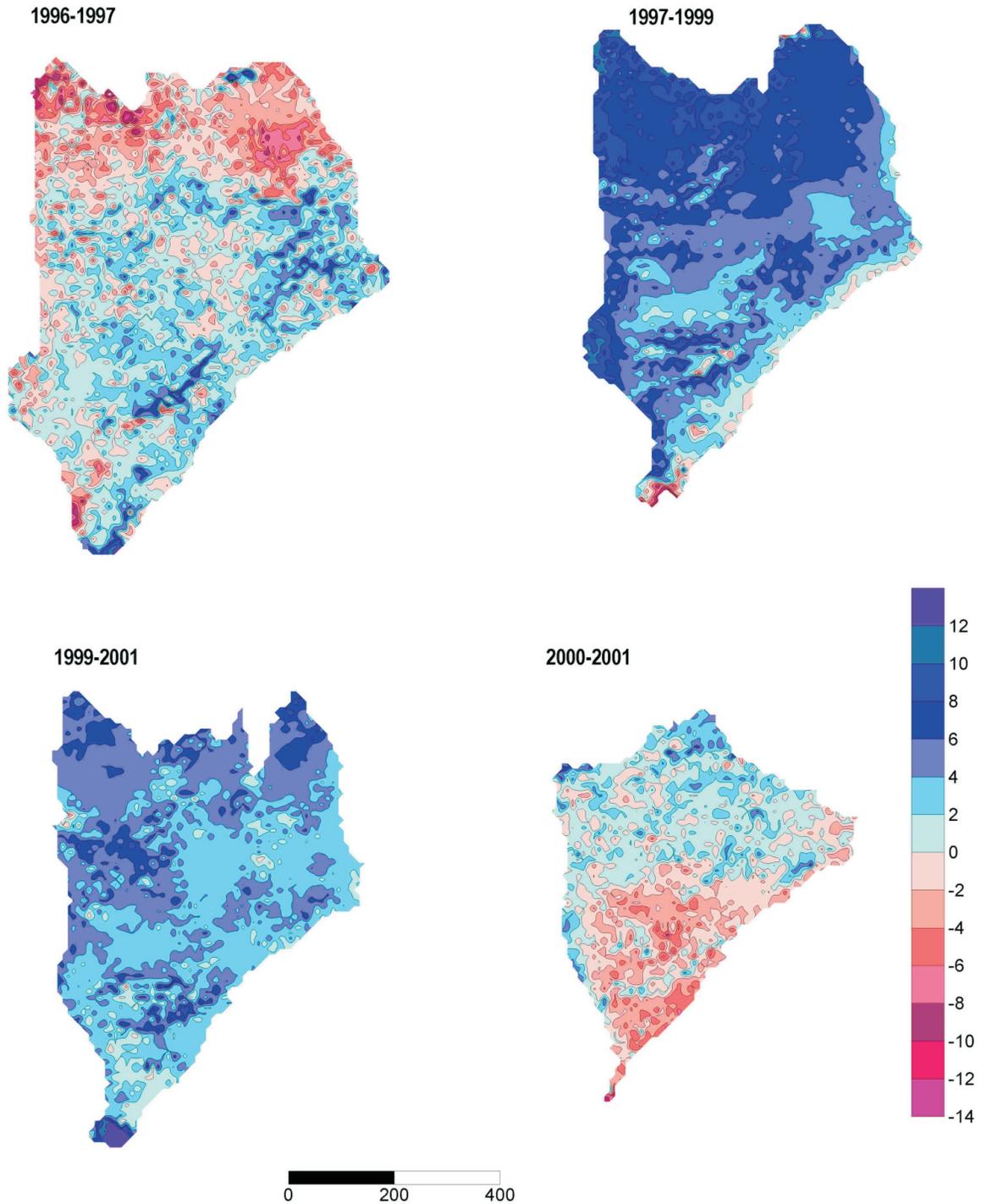


FIGURA 4. Cambios altitudinales de la superficie glaciar del Volcán Popocatepetl, obtenidos mediante la resta de modelos digitales de elevación.

Flujos piroclásticos, en el caso del volcán Popocatepetl, han sido esporádicos y en su interacción con el área glaciar del Popocatepetl han generado lahares. El número de lahares asociados a este fenómeno volcánico se desconoce. Sin embargo, este tipo de interacción ocurrió durante el evento explosivo del 22 de enero de 2001, cuando flujos piroclásticos de pómez al descender sobre el área glaciar generaron lahares. Uno de los cuales que fluyó por la barranca Huiloac a lo largo de 14 km, deteniéndose en las afueras del poblado de Santiago Xalitzintla. Después del paso de los flujos piroclásticos no se observaron cambios notables en el área glaciar, lo cual puede atribuirse a que la tefra depositada durante la etapa explosiva de los meses de noviembre y diciembre, aminoró el efecto erosivo y térmico característico de los flujos piroclásticos, a las características mismas del flujo como son temperatura, densidad y dimensiones o a una combinación de ambas.

Los eventos explosivos de considerable intensidad ocurridos a lo largo de 1994-2001 en el volcán Popocatepetl, se caracterizaron por la eyección de material incandescente sobre las laderas del volcán y en particular sobre el área glaciar. Con base en la ortofoto del 2 de febrero de 1999, en la parte frontal del glaciar, que corresponde a un área de 54,100 m², se contaron 185 cráteres de impacto o depresiones con diámetros que variaron en un rango de 1.2-7.5 m, asociados a algunos de los cráteres se observan pequeños flujos producidos por agua producto de la ablación.

La deposición de la tefra fue el evento más frecuente y tuvo una gran influencia en el balance de masa negativo, así como en la evolución morfológica del glaciar durante el actual período eruptivo. Tanto la deposición de la tefra como su posterior removilización dió lugar a complejas interacciones con la nieve y el hielo, ya que dependiendo de los espesores depositados de tefra sobre un glaciar, ésta puede favorecer o bien detener la ablación superficial. La distribución de la tefra sobre la superficie glaciar en el Popocatepetl fue heterogénea a lo largo de los años. Su distribución y espesor fueron determinados por la irregular morfología de la superficie glaciar, intensidad del evento eruptivo, así como la dirección de los vientos dominantes. La superficie glaciar mostraba grandes irregularidades, especialmente durante el período de máxima ablación, cuando las grietas incrementaban sus dimensiones y la superficie presentaba ondulaciones transversales a la pendiente. Esto favoreció la acumu-

lación de tefra en las partes deprimidas y con menor pendiente, en cambio en las partes de mayor pendiente la acumulación fue menor.

La heterogénea distribución de la tefra ocasionó diferencias en las características térmicas del glaciar, resultando en una ablación diferencial, unas partes experimentaron más ablación que otras. Algunas áreas deprimidas en la parte frontal del glaciar, al paso del tiempo se fueron cubriendo con una capa de tefra cuyo espesor detuvo la ablación superficial, lo que produjo la inversión del relieve. En estos sitios se desarrollaron bloques elevados con respecto a la superficie que los rodeaba.

Evolución glaciar

El comportamiento eruptivo del Popocatepetl determinó en gran medida los cambios geométricos y morfológicos del glaciar. No obstante, el aspecto climático siguió actuando durante el período de máxima ablación. Con base en las observaciones realizadas y los resultados obtenidos, se planteó un modelo de evolución glaciar, que consiste de cuatro etapas (FIGURA 5).

a) Etapa de ajuste: la deposición de tefra, dependiendo del espesor, favoreció o detuvo la ablación y alteró las tasas de ablación superficial. La tefra producto de las explosiones fue depositándose de manera heterogénea sobre la parte media y superior del área glaciar, a diferencia de la parte frontal, la cual se mantuvo libre de tefra por largos períodos. Un rasgo notable que se produjo, fue el abombamiento de la parte frontal del glaciar entre 1996-1997, la posible causa es que la tefra al depositarse sobre la superficie glaciar inhibió la ablación y adicionó masa al glaciar, lo que provocó un cambio en el espesor y como consecuencia en la tasa de esfuerzo. La dinámica glaciar se ajustó a esta nueva condición transmitiendo masa hacia la parte frontal del glaciar. De manera que, la masa glaciar desplazada hacia el terminus fue expuesta a la insolación diaria y estacional sin que se produjera acumulación de nieve. Lo que dio como resultado un balance de masa negativo.

b) Etapa de adelgazamiento: durante 1997-1999 el glaciar experimentó un considerable adelgazamiento. El glaciar perdió masa a elevadas tasas debido a la ablación diferencial como consecuencia de la irregular distribución del material piroclástico depositado sobre su superficie. Para el período 1999-2000, el adelgazamiento continuó, pero fue menos intenso como consecuencia de

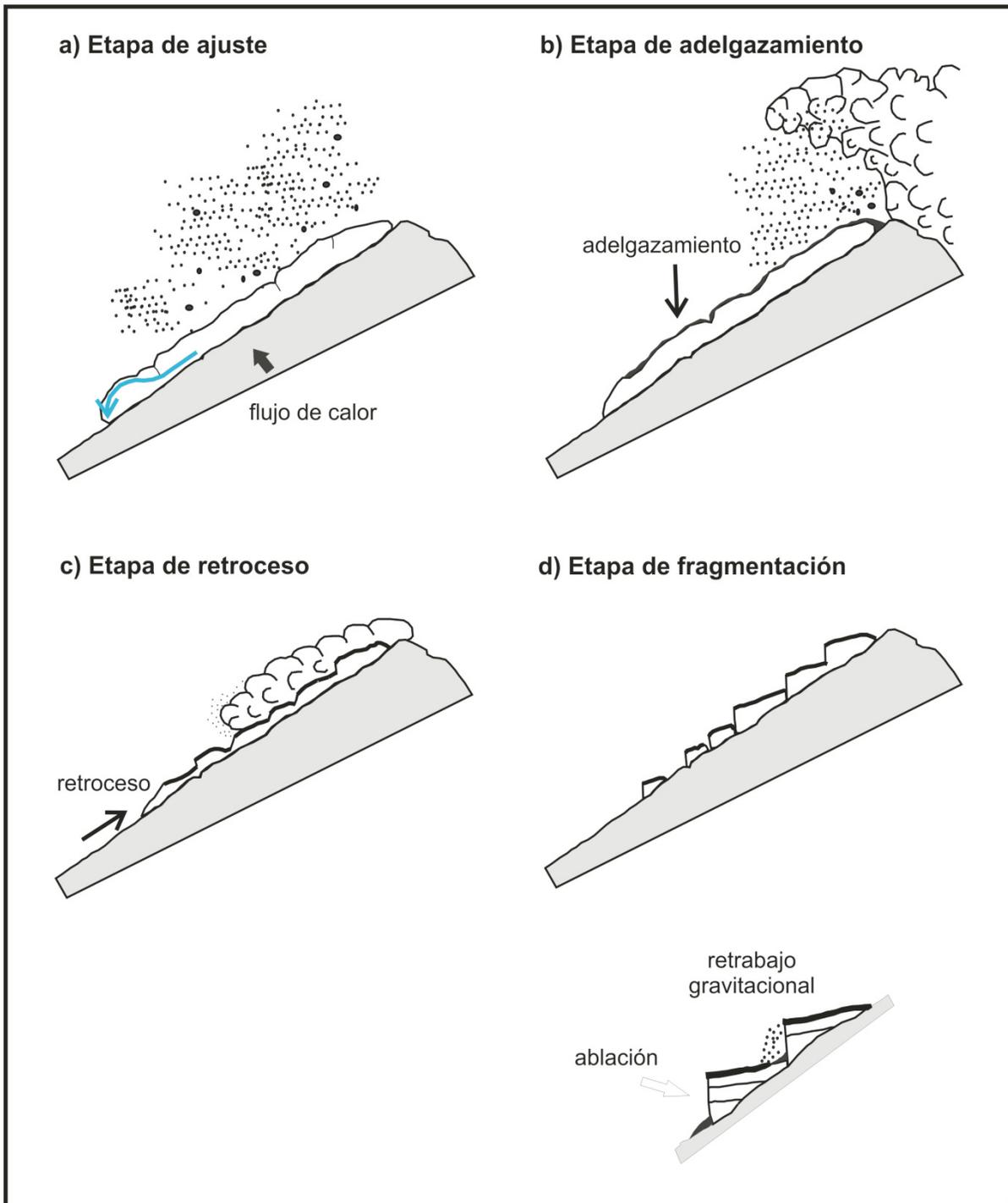


FIGURA 5. Esquema que muestra las cuatro etapas que conforman el modelo de evolución glaciar propuesto para el volcán Popocatépetl.

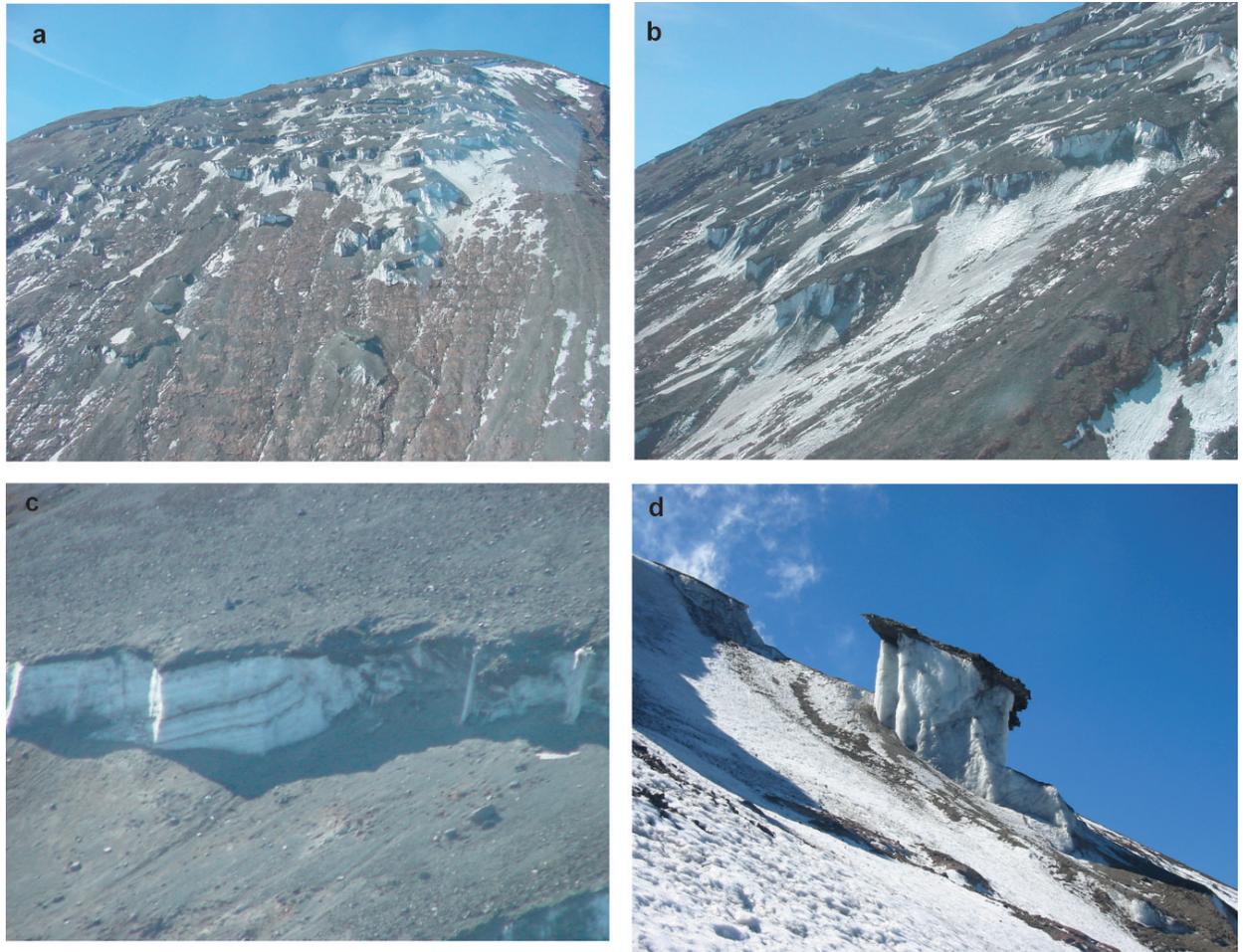


FIGURA 6. Acercamientos de l área glaciara del volcán Popocatepetl. a) Fragmentación del área glaciara. b) Vista lateral de los bloques de hielo cubiertos por tefra. c) Acercamiento a la cubierta de tefra producida por la actividad explosiva. d) Bloque de hielo aislado cubierto por tefra. Fotos: I. Farraz.

la baja actividad eruptiva ocurrida a lo largo de 1999. La parte frontal fue la más afectada, las lenguas glaciarae se adelgazaron considerablemente debido a la transmisión de masa hacia estas partes y como consecuencia de la deposición de tefra sobre su superficie. El incremento del flujo de calor, no obstante que no se ha cuantificado, puede considerarse como un factor que pudo haber favorecido la ablación de la parte basal del glaciara, en particular durante las fases de formación de domos.

c) Etapa de retroceso: como consecuencia de la pérdida considerable del volumen glaciara, en el año 2000 ocurrió un notable retroceso. La mayor pérdida ocurrió en el frente, las lenguas desaparecieron, los bordes laterales también retrocedieron, en particular el del sector este,

en donde ya se podían observar partes del lecho rocoso sobre el que se encontraba el glaciara.

d) Etapa de fragmentación: la fase de fragmentación fue producida por una combinación de procesos. Por un lado la ablación diferencial ocasionada por la distribución desigual de la tefra sobre la superficie glaciara y por otro la removilización recurrente de la tefra, ya sea por la actividad eruptiva o por la insolación diaria o estacional. La ablación diferencial provocó que la superficie glaciara desarrollara una morfología de bloques escalonados transversales a la pendiente. En tanto que, la removilización de la tefra mediante la generación de flujos debido al agua de fusión y la saturación de ésta, fue disectando la superficie glaciara. Los bloques

escalonados iniciales fueron cortados transversalmente, dando origen a bloques más pequeños (FIGURA 6a y 6b). En la parte frontal del área glaciar los bloques eran más pequeños que los de la parte superior, por lo que rápidamente fueron reduciendo sus dimensiones y desapareciendo, especialmente durante la temporada de ablación. Los bloques de mayores dimensiones lograron conservarse, gracias a la gruesa capa de tefra que los protegió de la ablación (FIGURA 6c). Así mismo, la ablación sobre las paredes de los bloques provocó la remoción de la tefra mediante procesos gravitacionales y en consecuencia la formación de pequeños conos de eyección al pie de las paredes de hielo (FIGURA 6d). Al final del proceso de fragmentación el área glaciar que existía en diciembre de 1994 quedó reducida a una serie de bloques de hielo adheridos al lecho rocoso.

CONCLUSIONES

El área glaciar del volcán Popocatepetl mostraba un marcado retroceso, antes de diciembre de 1994. Sin embargo procesos volcánicos como incremento en el flujo de calor, flujos piroclásticos, eyección de material incandescente y emisión y deposición de tefra sobre la superficie glaciar aceleraron la fusión e inhibieron la acumulación, alterando así el balance de masa glaciar. La caída de tefra fue el fenómeno volcánico más frecuente, por lo que su deposición sobre la superficie glaciar tuvo un impacto determinante en la evolución morfológica del área glaciar. La deposición de capas delgadas de tefra favoreció la ablación superficial del glaciar. Al paso del tiempo, la tefra fue acumulándose sobre la superficie formando una capa de irregular distribución y espesor. Esto provocó que la ablación superficial no tuviera la misma intensidad, las áreas con menor espesor experimentaron menos pérdidas y aquellas con mayor espesor fueron aisladas, esto dio lugar a un proceso de ablación diferencial, que después de un tiempo de actuar produjo, en algunas partes del glaciar, a una inversión del relieve.

Una vez que la tefra fue depositada sobre la superficie glaciar, fue removilizada por el agua producto de la fusión superficial. La removilización de la tefra se produjo en un rango variado de escalas espaciales y temporales. Durante las épocas de máxima ablación, la removilización de la tefra fue intensa. El agua de fusión producida ocasionó la saturación de la tefra y en consecuencia la generación de flujos de detritos de variadas dimensiones.

La frecuente generación de flujos fue disectando la superficie glaciar, lo que aunado a la ablación diferencial, produjo una morfología de bloques transversales. La parte frontal éstos bloques quedó expuesta a la insolación, lo que favoreció la ablación y la consiguiente removilización de la tefra por agua de fusión. Adicionalmente, la insolación sobre las paredes de los bloques provocó el derrumbe de la parte superior y la removilización de la tefra que los cubría mediante procesos gravitacionales. La tefra producida desde diciembre de 1994, ha sido parcialmente removida por la fusión glaciar, sin embargo un volumen importante se ha adicionado a las vertientes del volcán. El tiempo de residencia de la tefra en el volcán, el impacto de ésta en las tasas de erosión y en la formación de lahares disparados por lluvias, son aspectos que podrían ser estudiados y que aportarían información acerca de procesos sin-eruptivos y/o post-eruptivos.

Los resultados estimados acerca de los cambios de área superficial y el balance de masa del área glaciar del Popocatepetl, así como los cambios morfológicos producidos por los diversos fenómenos volcánicos a los largo de 1994-2001 en el Popocatepetl, permiten establecer que la actividad eruptiva aceleró el proceso de retroceso, que estaba ocurriendo desde el inicio de los ochentas, y que culminó con la fragmentación del área glaciar. La evolución morfológica del glaciar no permitió su aislamiento, a pesar de los considerables espesores de tefra que lo cubrieron. De esta manera el factor climático, aunque en menor medida, se sumó a la acción de los fenómenos eruptivos. La actividad eruptiva no fue el único factor pero si jugó un papel determinante.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Dirección General de Carreteras de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) y al Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) por proveer las fotografías aéreas del Popocatepetl empleadas en el presente estudio. Gracias a Lucio Cárdenas por compartir sus observaciones glaciológicas y a Isaac Farraz por su apoyo en el aspecto técnico. Este estudio fue apoyado por las becas 074-PÑ, 32527-T y 45433 otorgadas a Hugo Delgado-Granados. La autora agradece el apoyo otorgado por el CONACYT.

REFERENCIAS

- Benson, C.S. and Follet, A.B. (1986). Application of photogrammetry to the study of volcano-glacier interactions on Mount Wrangell, Alaska, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 52, pp. 813-827.
- Brugman, M. and Meier, M. (1981). Response of glaciers to the eruptions of Mt. St. Helens, In *The 1980 eruptions of Mt. St. Helens, Washington, USA* (Litman, P.W., Mullineaux, D.R. Eds.), pp. 743-756.
- Delgado-Granados, H., Arciniega, R. y Calvario, D. (1986). Los glaciares del Popocatepetl y el Iztaccíhuatl, *Comunicaciones Técnicas, Serie Investigación, I. de Geofísica, UNAM*, 20 p.
- Delgado-Granados, H. (1986). Los glaciares de México: metodologías para su estudio, *Comunicaciones Técnicas, Serie Investigación, I. de Geofísica, UNAM*, 20 p.
- Delgado-Granados, H. y Brugman, M. (1996). Monitoreo de los glaciares del Popocatepetl, en: *Volcán Popocatepetl. Estudios realizados durante la crisis de 1994-1995 UNAM-CENAPRED*, pp.221-244.
- Delgado-Granados, H. (1997). The glaciers of Popocatepetl volcano (Mexico): changes and causes, *Quaternary International*, Vol. 43, pp. 53-60.
- Driedger, C.L., (1981). Effect of ash thickness on snow ablation, In *The 1980 eruptions of Mt. St. Helens, Washington, USA* (Litman, P.W. and Mullineaux, D.R. Eds.), pp. 757-760.
- Haerberli, W., Hoelzle, M. and Maisch, M. (2001). Glaciers as key indicator of global climate change in *Climate of the 21st Century: Changes and Risk* (Lozán, J.L., GraBl, H. and Hupfer, P. Eds.), *Wissenschaftliche Auswertungen*, pp. 212-220.
- Huggel, C. and Delgado-Granados H. (2000). Glacier monitoring at Popocatepetl volcano, Mexico: glacier shrinkage and possible causes. In *Proceedings der Fachtagung der Schweizerischen Geomorphologischen Gesellschaft* (Hegg, C., Vonder Muehll, D. Eds.) *Beitraege zur Geomorphologie*, 8.-10. Juli 1999 in Bramois (Kt. Wallis), Birmensdorf, Eidgenoessische Forschungsanstalt WSL, pp.97-106.
- Lara, L. (2004). Overview of Villarrica Volcano, in *Villarrica Volcano (39.5°S), Southern Andes, Chile*, (Lara, L. and Clavero, J. Eds.), *Servicio Nacional de Geología y Minería*, Vol. 61, pp.5-12.
- Lorenzo, J.L. (1964). Los glaciares de México, *Monografías del Instituto de Geofísica, UNAM*, 2^a. ed., 123 p.
- Manville, V., Hodgson, K.A., Houghton, B.F., Keys J.R. and White, J.D.L. (2000). Tephra, snow and water: complex sedimentary responses at an active snow-capped stratovolcano, Ruapehu, New Zealand, *Bulletin of Volcanology*, Vol. 62, pp. 278-293.
- Palacios, D., Zamorano, J.J. y Gómez, A. (1998). La formación de lahares: reacción del glaciar del Popocatepetl (México) ante la presente actividad volcánica en *Investigaciones recientes de la geomorfología española* (Gómez, A. y Franch, S. Eds.), pp. 87-96.
- Pierson, T.C., Janda, R.J., Thouret, J.C. and Borrero, C.A. (1990). Perturbation and melting of snow and ice by the 13 November 1985 eruption of Nevado del Ruiz, Colombia, and consequent mobilization, flow and deposition of lahars, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 41, pp. 177-201.
- Sturm, M., Benson, C. and Mackeith, P. (1986). Effects of the 1966-68 eruptions of Mount Redoubt on the flow of Drift Glacier, Alaska, U.S.A., *Journal of Glaciology*, Vol.32, No. 112, pp. 355-362.
- Thouret, J.C. (1990). Effects of the November 13, 1985 eruption on the snow pack and ice cap of Nevado del Ruiz volcano, Colombia, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 41, pp. 177-201.
- Waitt R.B. Jr, Pierson, T.C., MacLeod, N.S., Janda, R.J., Voight, B. and Holcomb, R.T. (1983). Eruption-triggered avalanche, flood and lahar at Mt. St. Helens – effects of winter snowpack, *Science* 22, pp.1394-1397.
- Walder, J.S. (2000). Pyroclast/snow interactions and thermally driven slurry formation. Part I: theory for monodisperse grains beds, *Bulletin of Volcanology*, Vol. 62, pp. 105-118.
- Weitzberg, W. (1923). El ventisquero del Popocatepetl, *Memoria Sociedad Científica Antonio Alzate* 41, pp.65-90.
- White, S.E. (1954). The firm of the Popocatepetl volcano, *Journal of Glaciology*, Vol. 2, pp. 389-392.
- WHITE, S.E. (1981). Neoglacial and recent fluctuations on the Popocatepetl, México, *Journal of Glaciology*, Vol. 27, pp. 359-363.

Trabajo recibido: abril 23 de 2007
Trabajo aceptado: junio 22 de 2007

