



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

POSGRADO EN GEOGRAFÍA

**IMPACTO DE LA CAÍDA DE CENIZA
EN EL VOLCÁN DE COLIMA**

T E S I S
PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
DOCTORA EN GEOGRAFÍA

P R E S E N T A
RITA FONSECA ALVAREZ

Comité asesor:

Dra. Ana Lillian Martin Del Pozzo (Directora de tesis)

Dr. Ismael Pérez García

Dr. Mauro Valdés Barrón



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS

Estoy sumamente agradecida con la Dra. Ana Lillian Martin Del Pozzo por el conocimiento y experiencia que ha compartido incondicionalmente.

-Dr. Ismael Pérez García, por la asesoría en la aplicación del modelo de circulación del viento.

-Dr. Mauro Valdés por sus valiosos comentarios y sugerencias durante el desarrollo de la tesis.

- Dr. José Lugo Hubp por sus valiosas aportaciones durante la revisión de la tesis.

-Dr. Lorenzo Vázquez Selem por sus comentarios acertados que ayudaron a mejorar la calidad de este trabajo.

-Especialmente al Sr. Melchor Urzúa de Protección Civil de Colima y a su equipo de trabajo, por la hospitalidad y disponibilidad incondicional que nos brindaron durante el trabajo de campo.

-Al M. en C. Gabriel Reyes, director del observatorio vulcanológico de Colima por el apoyo brindado durante el trabajo de campo.

- Al Dr. Nick Varley por la información puntual sobre el estado actual del Volcán.

- A la Dra. Gloria Herrera Vázquez por la asesoría en el manejo de las radiosondas y registro de los radiosondeos.

El apoyo de las siguientes instituciones fue indispensable para el desarrollo de doctorado, por lo cual agradezco a:

- CONACYT, por la beca otorgada para el doctorado.

- DGAPA-PAPIIT, por el apoyo otorgado durante la terminación de la tesis.

- Instituto de Geofísica, UNAM., por la hospitalidad desde 1996.

-Biblioteca conjunta de Ciencias de la Tierra, Archivo Histórico de Colima y especialmente al Servicio Meteorológico Nacional, por las facilidades otorgadas para la consulta del material bibliográfico, fotográfico y adquisición de radiosondeos.

-Posgrado de Geografía, especialmente al Dr. Javier Delgado y a Penélope Márquez por el apoyo y orientación para la elaboración de los trámites administrativos.

-Al personal de cómputo del Instituto de Geofísica por el apoyo técnico que me brindaron durante el desarrollo de la tesis: principalmente a Iván, Daniel Rodríguez, Miguel Ángel García, Héctor Tecanhuey, Manuel Velásquez y a Gilberto Armando Casillas.

-A mis compañeros Fabiola, Mirna, Amiel, Rosalinda, Rocio, Anaid, Alan y a Dorilen por el apoyo durante el trabajo campo y búsqueda de información en el archivo de Colima. A Beatriz por su valiosa colaboración durante el desarrollo del artículo y especialmente a la Sra. Felipa por su atención y paciencia que ha tenido durante mi estancia en el instituto.

CONTENIDO

Lista de figuras	ii
Lista de tablas	iii
Lista de figuras del apéndice	iii
Resumen	v
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	
1.1. Objetivo central	1
1.1.2. Objetivos específicos	3
1.2. Hipótesis	3
1.3. Estructura de tesis	3
1.4. Método	4
1.5. Referencias	7
CAPITULO 2. HISTORIA ERUPTIVA	
2.1. Ciclicidad eruptiva	8
2.2. Ciclo I (?-1611)	9
2.3. Ciclo II (1611-1690)	10
2.4. Ciclo III (1690-1818)	10
2.5. Ciclo IV (1818-1913)	12
2.6. Ciclo V (1913-?)	15
2.7. Referencias	19
CAPITULO 3. COLUMNAS ERUPTIVAS	
3.1. Estructura de las columnas eruptivas	23
3.2. Altura y dispersión de las columnas volcánicas	26
3.3. Sedimentación y estimación del volumen	28
3.4. Modelos numéricos aplicados a depósitos de tefra	30
3.5. Referencias	32
CAPITULO 4. MODELO DEL CAMPO DE VIENTO	
4.1. Base Global Gridded Upper Air Statistics (GGUAS)	38
4.2. Base teórica del modelo cinemático de campo de viento (MCV)	38
4.3. Algoritmo numérico cinemático para seguir la trayectoria de ceniza volcánica	42
4.4 Referencias	43
CAPITULO 5. RESULTADOS DEL CAMPO DE VIENTO HORIZONTAL	
5.1. Distribución del campo de viento	44
5.2. Referencias	59
CAPÍTULO 6. ESCENARIOS PARA CAÍDA DE CENIZA	
6.1. Estimación de escenarios	61
6.2. Efectos por escenario	63
6.3. Tiempo probable de transporte de ceniza	89
6.4. Referencias	89
CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES	91
APÉNDICE	97

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. A. Localización geográfica del Volcán de Colima	2
Figura 1 B: Volcán de Colima y ciudades principales	2
Figura 2. Registro de la actividad volcánica	10
Figura 3-A. Volcán de Colima, 1909	14
Figura 3-B. Vista de los volcanes Colima y Nevado en 1912	14
Figura 4. Columna volcánica del 19 de enero de 1913	15
Figura 5. Segunda erupción del 20 de enero de 1913	15
Figura 6. Cráter destruido con bordes irregulares, 1913	15
Figura 7. Lava en el interior del cráter, 1941	16
Figura 8. Desbordamiento del cráter, derrames de lava de 1961 y 1975	16
Figura 9. Cono desde lado norte, 2005	19
Figura 10. Cráter ocupado por domo inclinado hacia el oeste, 2010	19
Figura 11. Estructura de una columna eruptiva	25
Figura 12. Capas atmosféricas	26
Figura 13. Líneas de corriente y tipos de movimiento	38
Figura 14. Campo del viento horizontal a 700 mb	46
Figura 15. Campo de viento horizontal 500 mb	47
Figura 16. Campo de viento a 300 mb	49
Figura 17. Campo de vientos a 100 mb	51
Figura 18. Campo de viento a 70 mb	53
Figura 19. Campo de viento a 50 mb	54
Figura 20. Campo de viento a 10 mb	56
Figura 21. Campo de viento a 30 mb	57
Figura 22. Campo de viento para el Volcán de Colima de 500 mb hasta 10 mb	57
Figura 23. Dirección del viento diaria mensual (1990-2005)	60
Figura 24A. Isopacas de 100, 50, 15.0 a 1.0cms de la erupción del 20 de enero de 1913	61

Figura 24B. Isopacas de 0.5, 0.1 y 0.01 cms de la erupción de 1913	62
Figura 25. Escenario 1	65
Figura 26. Escenario 2	71
Figura 27. Escenario 3	74
Figura 28. Escenario 4	78
Figura 29. Escenario 5	81
Figura 30. Escenario 6	85
Figura 31. Escenario 7	88

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Niveles atmosféricos estándar de la base Global Gridded Upper Air Statistic (1980-1995)	38
Tabla 2. Grupos para el campo de viento horizontal por nivel atmosférico estándar	44
Tabla 3. Velocidad media mensual del viento horizontal, Volcán de Colima de 700 a 10 mb	45
Tabla 4. Impactos esperados por escenario	64

LISTA DE FIGURAS APÉNDICE

Figura 1. Campo de viento horizontal a 700 mb de enero a abril	98
Figura 2. Campo de viento horizontal a 700 mb de mayo a agosto	99
Figura 3. Campo de viento horizontal a 700 mb de septiembre a diciembre	100
Figura 4. Campo de viento horizontal a 500 mb de enero a abril	101
Figura 5. Campo de viento horizontal a 500 mb de mayo a agosto	102
Figura 6. Campo de viento horizontal a 500 mb de septiembre a diciembre	103
Figura 7. Campo de viento horizontal 400 mb de enero a abril	104
Figura 8. Campo de viento horizontal a 400 mb de mayo a agosto	105
Figura 9. Campo de viento horizontal a 400 mb de septiembre a diciembre	106
Figura 10. Campo de viento horizontal a 300 mb de enero a abril	107
Figura 11. Campo de viento horizontal a 300 mb de mayo a agosto	108

Figura 12. Campo de viento horizontal a 300 mb de septiembre a diciembre	109
Figura 13. Campo de viento horizontal a 250 mb de enero a abril	110
Figura 14. Campo de viento horizontal a 250 mb de mayo a agosto	111
Figura 15. Campo de viento horizontal a 250 mb de septiembre a diciembre	112
Figura 16. Campo de viento horizontal a 200 mb de enero a abril	113
Figura 17. Campo de viento horizontal a 200 mb de mayo a agosto	114
Figura 18. Campo de viento horizontal a 200 mb de septiembre a diciembre	115
Figura 19. Campo de viento horizontal a 150 mb de enero a abril	116
Figura 20. Campo de viento horizontal a 150 mb de mayo a agosto	117
Figura 21. Campo de viento horizontal a 150 mb de septiembre a diciembre	118
Figura 22. Campo de viento horizontal a 100 mb de enero a abril	119
Figura 23. Campo de viento horizontal a 100 mb de mayo a agosto	120
Figura 24. Campo de viento horizontal a 100 mb de septiembre a diciembre	121
Figura 25. Campo de viento horizontal a 70 mb de enero a abril	122
Figura 26. Campo de viento horizontal a 70 mb de mayo a agosto	123
Figura 27. Campo de viento horizontal a 70 mb de septiembre a diciembre	124
Figura 28. Campo de viento horizontal a 50 mb de enero a abril	125
Figura 29. Campo de viento horizontal a 50 mb de mayo a agosto	126
Figura 30. Campo de viento horizontal a 50 mb de septiembre a diciembre	127
Figura 31. Campo de viento horizontal a 30 mb de enero a abril	128
Figura 32. Campo de viento horizontal a 30 mb de mayo a agosto	139
Figura 33. Campo de viento horizontal a 30 mb de septiembre a diciembre	130
Figura 34. Campo de viento horizontal a 10 mb de enero a abril	131
Figura 35. Campo de viento horizontal a 10 mb de mayo a agosto	132
Figura 36. Campo de viento horizontal a 10 mb de septiembre a diciembre	133

RESUMEN

El Volcán de Colima actualmente es similar a la actividad que precedió a las erupciones de 1818 y 1913. Una erupción explosiva de magnitud similar puede ocurrir próximamente, por lo que se identificaron las áreas de peligro por caída de ceniza y su impacto. A partir de la componente diaria mensual del viento local (17 000-28 000 msnm) y viento horizontal, reconstrucción de actividad eruptiva, isopacas de 1913, uso del suelo y datos socioeconómicos se propusieron 7 escenarios para caída de ceniza por una erupción pliniana > a 23 km de altura. Se adaptó el modelo numérico de diagnóstico global para obtener el campo horizontal a partir de los radiosondeos globales (1980-1995) del European Centre for Medium Range Weather Forecast para obtener la componente media mensual del viento cada 2.5° de latitud por 2.5° de longitud para 15 niveles atmosféricos estándar y se complementó con el análisis vertical de radiosondeos diarios de Guadalajara y Manzanillo (1980-2005). Los registros de dirección e intensidad del viento se organizaron en 4 grupos: 4 000-9 000, 9 000-14 000, 14 000-17 000 y 17 000-28 000 msnm.

De enero a marzo (escenario 1), la caída podría irse al noreste. Alrededor de 100 cm de pómez, lapilli o ceniza sepultarían el bosque de coníferas y la fauna moriría por asfixia, deshidratación o sepultamiento. El equipo sísmico, cámaras y alarmas/lahares de Juan Barragán serían destruidos por 50 cm de pómez, lapilli y ceniza. La Laguna de Zapotlán se contaminaría con 15 cm de caída y más de 100 mil habitantes podrían tener problemas oculares, de piel, respiratorios y estrés. En Ciudad Guzmán, Atenquique y Zapotiltic podrían colapsarse los techos. Los cultivos de caña de azúcar, agave, hortalizas, granos, leguminosas y árboles frutales serían dañados, el ganado podría morir por ingerir pastos y agua contaminada por la ceniza. Los transformadores de las subestaciones eléctricas de CG, Tamazula y San Gabriel se dañarían. En las terracerías y en la carretera Colima-Guadalajara habría poca visibilidad. En los aeropuertos de Guadalajara, León, Aguascalientes, San Luis Potosí, Ciudad Victoria y Celaya caería de 0.01 a 0.5 cm de ceniza y ocasionaría cancelación de vuelos, desviación de rutas aéreas e interferencia en las transmisiones. Las refinerías de Salamanca y San Luis Potosí tendrían más de 0.1 cm.

En abril o en octubre (escenario 2), la zona afectada sería al este. El impacto esperado puede ser similar al del escenario 1 con 100 y 50 y 15 cm de espesor, el último afectando a más de 20 mil personas. Los filtros de las chimeneas, maquinaria y materia prima de la fábrica de papel de Atenquique se dañarían. El ingenio de Quesería tendría daños por más de 1 cm de caída. La acumulación de cenizas en los ríos que desembocan en el río Tuxpan podría generar inundaciones. La falta de visibilidad dificultaría el tránsito de los vehículos sobre la carretera Guadalajara-Manzanillo, los aeropuertos de Colima, Zamora, Uruapan tendrían de 0.5 a 1 cm de ceniza y los aeropuertos de Morelia, Ciudad de México, Puebla, Querétaro, Toluca, Cuernavaca, Celaya y Pachuca de 0.01 a 0.1 cm. La ceniza en la atmósfera ocasionaría cancelación de vuelos, desviación de rutas aéreas e interferencia en las transmisiones de las estaciones de microondas de radio y TV.

En mayo se presentan dos escenarios: nornoreste (escenario 3) y nornoroeste (escenario 4). La caída de 100 y 50 cm produciría efectos similares al del escenario 1. El equipo sísmico, visual y la estación de microondas de radio y TV al norte del volcán se dañarían. Más de

120 mil personas serían afectadas por 15 cm de caída; Las alarmas/lahares de Juan Bsrragán y Atenquique, así como la fábrica de Zapoltitic se dañarían. El ingenio de Quesería y la fábrica de Atenquique tendrían más de 1 cm. Las terracerías y carreteras Guadalajara-CG-Colima tendrían poca visibilidad. Los aeropuertos de Guadalajara, Aguascalientes, León, San Luis Potosí, Zacatecas y Zamora tendrían de 0.01 a 0.5 cm y sus efectos serían similares a los del escenario 1. El escenario 4 al nornoroeste muestra que los efectos serían similares al escenario 1 con más de 100 y 50 cm de espesor. La acumulación de piroclastos en los afluentes de La Lumbre formaría lahares si hay lluvias en mayo. Más de 4 210 habitantes serían afectados por más de 15 cm de caída. La estación de microondas y subestación eléctrica de San Gabriel y la carretera Guadalajara-San Gabriel se dañarían. La fábrica de Zapoltitic se dañaría al caer más de 1 cm de ceniza. En los aeropuertos de Guadalajara, Zacatecas, Durango y Tepic y aeropistas de la Sierra Huichol los efectos serían similares al escenario 1 por la caída de 0.01 a 0.5 cm. Las lagunas de Zapotlán y Sayula también presentarían daños.

De junio a agosto la caída de ceniza sería al noroeste (escenario 5). El efecto para 100 y 50 cm de espesor sería similar al del escenario 1. Más de 9 150 habitantes serían afectados por 15 cm de caída; la aeropista de Zapotitlán de Vadillo y las carreteras Guadalajara-Ciudad Guzmán, Guadalajara-San Gabriel se bloquearían y tendrían problemas de visibilidad. Los ranchos El Borbollón, Shulte y El Jabalí, la Hacienda San Antonio y el centro recreativo La María recibirían más de 1 cm de caída. La acumulación de material piroclástico podría formar lahares en la Lumbre, el Zarco y Atenquique. Las fábricas de Atenquique y de Zapotiltic se afectarían. La estación de microondas de la Becerrera, las subestaciones de Zapotiltic, el Grullo y Mazamitla tendrían cortocircuitos y problemas en las transmisiones. Las Lagunas de Zapotlán y Sayula tendrían más de 0.5 cm de ceniza. Las actividades turísticas de Puerto Vallarta se afectarían al caer 0.1 cm; las turbinas de la termoeléctrica de Jumatán y los filtros de las refinerías de Tepic y Aguamilpa podrían dañarse. Los aeropuertos de Puerto Vallarta, Tepic, Manzanillo, Mazatlán, Colima y Escuinapa tendrían de 0.01 a 0.1 cm. La ceniza podría permanecer más tiempo en la atmósfera por la circulación anticiclónica que se forma en estos meses y se vería afectada sobre todo el turismo de Mazatlán.

En septiembre se afectaría el lado oeste del volcán (escenario 6), cuyo efecto sería similar al escenario 1 con 100 cm de espesor. Los ranchos El Jabalí, Shulte y el Borbollón tendrían daños mayores por 50 cm de ceniza. Las aeropistas de Zapotitlán de Vadillo y del Jabalí y la carretera Zapotitlán de Vadillo-Guadalajara quedarían bloqueadas al caer más de 15 cm, podría haber lahares en las barrancas la Lumbre, San Antonio, Montegrande, Arena, Zarco y Cordobán y en el río Armería. La subestación eléctrica de San Gabriel y estación de microondas se dañarían por 1 cm de caída. La salinera de Cuyutlán y termoeléctricas de Manzanillo tendrían más de 0.1 cm y los aeropuertos de Colima, Manzanillo, Puerto Vallarta, Tecomán y Sayula de 0.01 a 0.1 cm con efectos similares a los del escenario 1. Las actividades turísticas y marítimas de Manzanillo y Puerto Vallarta se afectarían temporalmente. Las partículas finas permanecerían más tiempo en la atmósfera por la circulación anticiclónica que se forma en este mes. El escenario 7 se presentaría en noviembre-diciembre y tendría efectos similares al escenario 6, pero con una ligera orientación más al oeste-suroeste afectando más a Colima y Tecomán.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

La emisión de piroclastos es un fenómeno común que puede afectar a la población y las actividades económicas por el impacto que producen al quedar suspendidas en el aire o al depositarse por gravedad. Los piroclastos de caída se distinguen por su tamaño y se clasifican en: ceniza, lapilli, bombas y bloques que están formados por diferentes proporciones de vidrio vesicular (pómez) o no, líticos y cristales. Las cenizas pueden cubrir grandes extensiones y ocasionar colapso de techos, problemas de salud a la población, pueden paralizar el tráfico aéreo, sepultar los cultivos y asfixiar o enfermar al ganado que se encuentra al aire libre. En el Volcán de Colima las erupciones plinianas ocurren aproximadamente cada 100 años (Martin Del Pozzo et al., 1988; Luhr y Carmichael, 1982; Saucedo et al., 2010), además la actividad actual es similar a la etapa precursora de las erupciones explosivas de 1818 y 1913 porque el cráter está obstruido por un domo y presenta explosiones vulcanianas alternadas con periodos de baja actividad.

El Volcán de Colima ($19^{\circ}30'44''\text{N}$ y $103^{\circ}37'02''\text{W}$) con 3 980 msnm, se encuentra en la parte occidental del Sistema Volcánico Transmexicano (SVT) y forma parte del complejo volcánico de Colima. El actual Volcán de Colima es uno de los volcanes más activos de México (Figura 1A y 1B).

Este trabajo tiene como objetivo principal evaluar la actividad eruptiva y realizar un análisis de la distribución de la ceniza y de los vientos a diferentes altitudes, para determinar las direcciones preferenciales del viento e identificar los escenarios por caída de ceniza en eventos plinianos tipo 1913. Es necesario identificar las áreas de peligro por caída de ceniza ante una futura erupción pliniana porque en esta área se encuentra una alta densidad de población, actividad económica agrícola, ganadera, comercial e industrial, así como infraestructura de aeronavegación y vías de comunicación como carreteras que conectan al norte y centro del país.

1.1. Objetivo Central

Evaluar la actividad pliniana y la distribución de los depósitos de caída en este tipo de evento, analizar el comportamiento de los vientos en la zona de influencia del Volcán de

Colima para determinar las direcciones preferenciales de la caída de ceniza. Con estos resultados se estimarán las zonas de peligro y se identificarán los efectos de la ceniza en el medio ambiente ante futuras erupciones de este tipo.

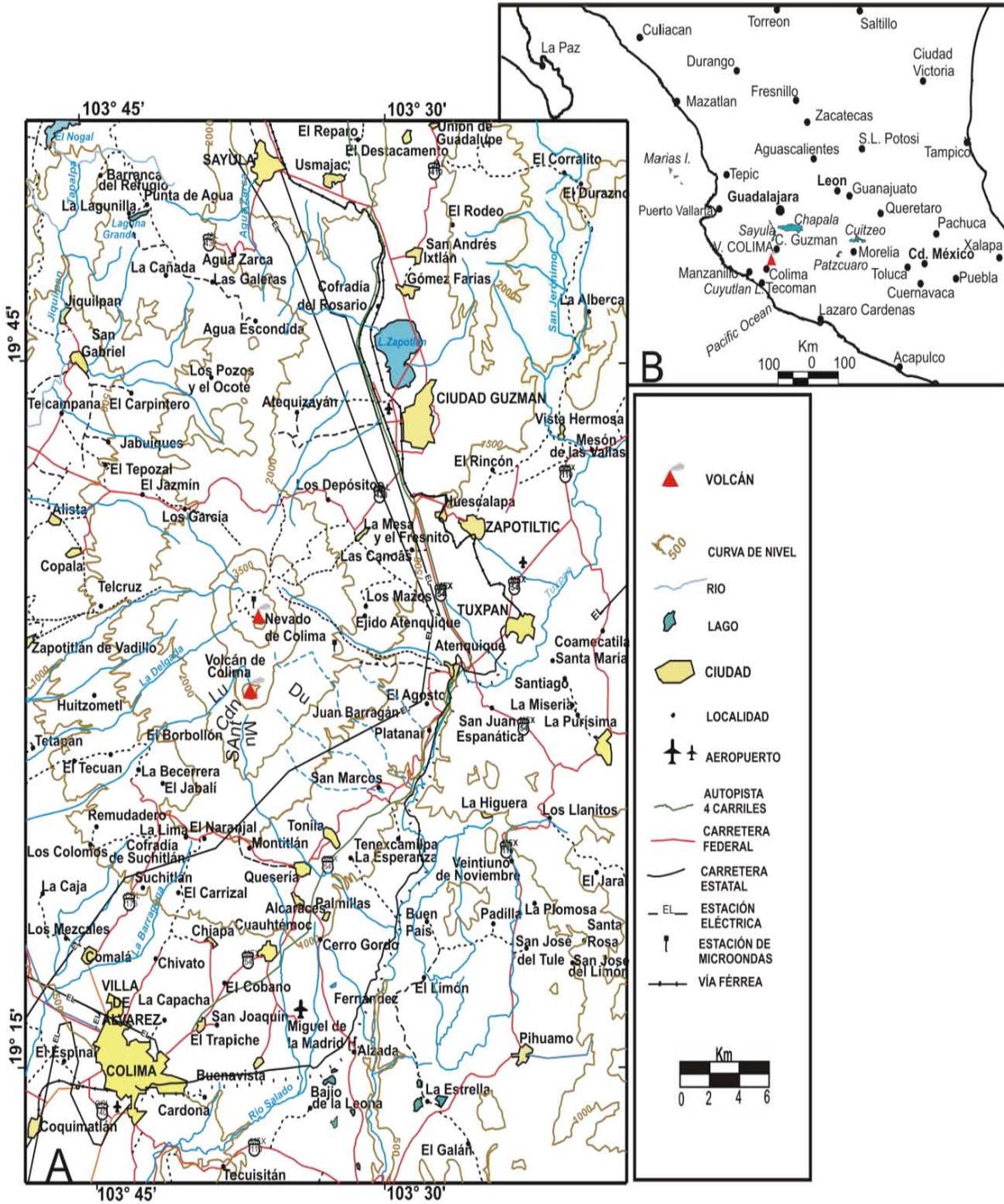


Figura 1A. Localización geográfica del Volcán de Colima. Barrancas Principales: Lu: La Lumbre; SAnt: San Antonio; Mu: El Muerto; Du: Durazno; Cdn: Cordoban. Figura 1B: Volcán de Colima y ciudades principales.

1.1.2. Objetivos específicos

- Evaluar la actividad eruptiva histórica y reciente del Volcán de Colima.
- Reconstruir las isopacas de la erupción de 1913 a partir de registros históricos y trabajo de campo.
- Modelar el campo de viento de la superficie hasta 30 km de altitud.
- Identificar las direcciones potenciales del viento por estratos altitudinales en la zona de influencia del Volcán de Colima.
- Proponer los escenarios mensuales por caída de ceniza para un evento pliniano.
- Identificar las localidades vulnerables por caída de ceniza de acuerdo con la distribución del viento en diferente época del año.
- Estimar los efectos futuros por localidad, actividad económica e infraestructura para cada escenario.

1.2. Hipótesis

El Volcán de Colima ha tenido erupciones plinianas recurrentes que han impactado a las zonas aledañas. La dirección de los vientos y altura de la columna definen la distribución de los piroclastos de caída, parámetros que permitirán estimar las áreas de peligro por caída de ceniza y permitirán identificar las localidades e impactos en el medio ambiente ante la ocurrencia de una erupción similar.

1.3. Estructura de la tesis

La tesis consiste en un trabajo geográfico que integra tópicos que son tratados por diferentes disciplinas (Vulcanología y Meteorología) y está organizado de la siguiente manera:

Capítulo 1. Introducción

Incluye la ubicación geográfica, objetivos, hipótesis y el método utilizado en esta investigación.

Capítulo 2. Historia eruptiva

Este capítulo presenta los resultados de la evaluación histórica que se realizó para la actividad histórica y actual del Volcán de Colima. El análisis se presenta en 5 ciclos eruptivos con el detalle de la actividad eruptiva para cada uno.

Capítulo 3. *Columns eruptivas*

Se revisan diferentes conceptos sobre las columnas volcánicas. La propuesta es proveer la base teórica para entender la estructura de las columnas eruptivas, su dinámica y dispersión en la atmósfera. También se presenta el estado del arte sobre los modelos de simulación numérica para contextualizar las contribuciones de la tesis.

Capítulo 4. *Modelo de campo de viento*

La base teórica del modelo cinemático para realizar el análisis horizontal del campo de viento se presenta en este capítulo. Se explican las ecuaciones que se implementaron para ejecutar el procesamiento de la base de datos Global Gridded Upper Air Statistics (GGUAS).

Capítulo 5. *Resultados del campo de viento*

Este capítulo presenta los resultados del análisis del campo de viento horizontal. Se dan las direcciones dominantes por mes para los 15 niveles atmosféricos estándar. Se incluyen también los resultados del procesamiento de radiosondeos de las estaciones de Manzanillo y Guadalajara. Al final de capítulo se integra un anexo con las figuras del campo de viento que pueden ser utilizadas en áreas volcánicas activas de la República Mexicana.

Capítulo 6. *Escenarios para caída de ceniza*

Se integran los resultados de los estudios meteorológicos y vulcanológicos para estimar los escenarios. Se identifican las áreas de mayor peligro de acuerdo con la dirección dominante por mes del campo de viento. Se da la caracterización socioeconómica por escenario y las posibles afectaciones. Este capítulo engloba los efectos de la ceniza en el medio ambiente a partir de un evento pliniano con la finalidad de mitigar el efecto de una erupción similar en el futuro.

Capítulo 7. *Conclusiones*

El último capítulo señala las contribuciones originales de esta tesis e indica las líneas futuras de investigación consideradas en este campo.

1.4. Método

El análisis de la actividad eruptiva del Volcán de Colima se realizó a través de la re-evaluación detallada de documentos históricos y publicaciones recientes. Método anteriormente aplicado por Martin Del Pozzo y Romero (1988) y Martin Del Pozzo, et al.,

(1995a). El trabajo de campo consistió en estudiar los depósitos para identificar los productos volcánicos de caída de 1913 (ceniza, lapilli y pómez). También se hizo el reconocimiento socioeconómico en las localidades Ciudad Guzmán, San Marcos, Queseria, La Yerbabuena, Colima, Sayula y en los ranchos El Borbollón y El Jabalí, porque tuvieron caída de ceniza en las erupciones de 1770, 1818 y 1913; además, son las que reciben caída de ceniza en la mayor parte del año.

Se utilizaron los datos de viento mensual de 15 años (1980-1995) de la base Global Gridded Upper Air Statistics (GGUAS) del European Centre for Medium Range Weather Forecast (ECMWF), adquiridos en el National Climatic Data Center (NCDC). La base de datos se procesó en el modelo cinemático del campo de viento global. La malla del modelo se adaptó para una zona local (México) con las siguientes coordenadas extremas 10°N 125°W y 35°N 85°W. La resolución espacial de los datos utilizados en la base GGUAS es homogénea de 2.5° de latitud \times 2.5° de longitud. El modelo utilizó la proyección cilíndrica porque fue la que presentó menor deformación en los trópicos, y en los cálculos se usaron coordenadas esféricas por ser las más indicadas para representar el movimiento global de gran escala.

Se generó un job en el sistema Unix-Linux para hacer los cálculos de los parámetros de vorticidad, divergencia, función corriente y función potencial. Se utilizó el campo de vientos horizontal (u , v) y de la altura geopotencial z en 15 niveles de presión estándar: nivel de superficie, 1000 mb, 850 mb, 700 mb, 500 mb, 400 mb, 300 mb, 250 mb, 200 mb, 150 mb, 100 mb, 70 mb, 50 mb, 30 mb y 10 mb.

Se resolvieron las ecuaciones de Poisson usando el método numérico espectral sobre la malla Gaussiana para obtener la función corriente y función potencial en toda la esfera terrestre. La función corriente está asociada a las zonas de rotación o de vorticidad y la función potencial con las zonas de convergencia y/o divergencia a escala global y local. Se generaron los mapas del campo de viento real, viento rotacional ó viento no divergente, zonas de viento irrotacional o viento de divergencia-convergencia por mes para cada nivel

atmosférico. A partir del viento real se obtuvieron los campos de vorticidad, convergencia y divergencia. La vorticidad es un vector de medición de la rotación local del flujo de aire, cuando la vorticidad es positiva la circulación es ciclónica; su sentido de rotación es contrario a las manecillas del reloj en el hemisferio Norte y viceversa en el hemisferios Sur, y se asocia a sistemas de baja presión. Si la vorticidad es negativa, la circulación es anticiclónica, y su sentido de rotación es igual al de las manecillas del reloj en el hemisferio Norte, a la inversa en el hemisferio Sur y está asociada a sistemas de alta presión. La convergencia es el choque de las líneas de flujo del viento que generan movimientos convectivos (ascenso del aire) hacia las zonas de baja presión y la divergencia es la evacuación de aire que se produce en zonas de alta presión.

Se utilizó el Ncar Graphic para graficar el campo vectorial de viento, los campos escalares de la función corriente muestran las zonas de rotación, mientras que la función potencial nos da las zonas de convergencia-divergencia. Durante el procesamiento de los datos fue necesario introducir el nivel atmosférico que se deseaba calcular, así como el incremento máximo y mínimo para graficar los contornos o isolíneas de altura geopotencial, función corriente y función potencial. Los incrementos variaron de acuerdo al mes y nivel atmosférico.

A partir del viento horizontal se obtuvieron las zonas de rotación, y las de convergencia-divergencia con base en la función corriente y la función potencial. Estos resultados se complementaron con el procesamiento de los radiosondeos diarios de Manzanillo y Guadalajara de 15 años (1990 a 2005).

Ante la posibilidad de un evento pliniano en el VC se estimaron los escenarios por caída de ceniza para cada mes. La altura de la columna eruptiva e isopacas de la erupción pliniana de 1913 se reconstruyeron con los registros históricos y de campo. También se integró la dirección dominante del viento diario mensual de 17 a 28 km de altitud de los radiosondeos de 1990-2005, validada con los resultados del modelo cinemático del campo de viento horizontal. También se incluyeron las siguientes variables socioeconómicas por localidad: número total de población, tipo de actividad económica; así como las estaciones de

microondas de radio y TV, tipo de carreteras, número de subestaciones eléctricas, aeropuertos internacionales y nacionales. Esta información fue obtenida a partir de los censos de población y vivienda del 2005 y anuarios estadísticos 2007 y 2008 por estado, publicados por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). Los mapas se realizaron a escala 1: 250 000 y 1:1 000 000 para mostrar el alcance proximal y distal de las isopacas.

1.5. REFERENCIAS

- Luhr, J. F. Carmichael, I. S. E. (1982). The Colima volcanic complex, Mexico: Part III. Ash and scoria-fall deposits from the upper slopes of Volcán Colima: *Contrib. Mineral. Petrology* 80:262-275
- Martin Del Pozzo, A. L., y Romero, M. V. H. (1988). El Volcán de Colima: un estudio sobre riesgo. *Litosfera*. 2:1:43-55
- Martin Del Pozzo, A. L., Sheridan, M., Barrera, D., Lugo, H. J y Vázquez, S. L .(1995a). Potencial hazards from Colima Volcano. *Geofísica Internacional*. 34:4:363-376
- Saucedo, R., Macías, J. L. Gavilanes,, J. C., Arce, J. L., Komorowski, C., Gardner, J. E., Valdez-Moreno, G. (2010). Eyewitness, stratigraphy, chemistry, and eruptive dynamics of the 1913 Plinian eruption of Volcan de Colima, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 191:149-166

CAPITULO 2. HISTORIA ERUPTIVA

En el Volcán de Colima se han reportado desde la época prehispánica emisiones de tefra (pómez, lapilli, ceniza de grano grueso a fino) producto de erupciones con diferente grado de magnitud. Las erupciones de 1818 y 1913 generaron depósitos de tefra con más de 1 m de espesor en el sector este y noreste (Martín Del Pozzo et al., 1995a, Saucedo et al., 2010).

2.1. Ciclicidad eruptiva

Los registros históricos de 430 años mostraron que se presenta un patrón cíclico con erupciones plinianas cada 100 años. Bárcena (1887), Starr y Arreola (1903), fueron los primeros en identificar que el VC tuvo periodos de actividad efusiva y explosiva con intervalos de reposo. También identificaron que la explosividad de las erupciones aumentaba hasta culminar con un evento violento. Waitz (1932) consideró un patrón cíclico que culmina con eventos más violentos de tipo peleano (1611, 1818 y 1913). Waitz (1932) propuso que la lava asciende lentamente, llena el cráter (1576, 1770, 1880) y después produce erupciones que lo vacían parcialmente. Luhr y Carmichael (1982), Martín Del Pozzo et al., (1988) y Robin et al., (1991) propusieron 4 ciclos eruptivos con base en un análisis histórico eruptivo. Cada ciclo culminó con una fase peleana que expulsa el domo central y destapa totalmente el cráter. Después de la erupción de 1818, entre 1834 y 1866 se midió el ascenso de lava desde 300 y 200 m de profundidad (Bárcena, 1887). También después de la erupción de 1913, la lava se encontró a 300 m de profundidad en 1922, subió 50 m en 1931 y el cráter estaba casi lleno en 1944 (Waitz, 1932; Mooser, 1961). Durante varias décadas la lava asciende lentamente hasta formar un domo central; continúan erupciones intermitentes de lava o piroclastos que terminan con una erupción explosiva acompañada de flujos piroclásticos y extensa caída de ceniza, hasta quedar limpio el cráter y dar inicio un nuevo ciclo. Luhr y Carmichael (1990) asociaron las variaciones de composición magmática en cada ciclo eruptivo. Estos autores identificaron que los magmas fueron andesitas básicas en las erupciones explosivas del segundo y tercer ciclo (1690-1818, 1818-1913), mientras que en el último ciclo fue un magma andesítico rico en hornblenda y por lo tanto contenía mayor cantidad de agua.

En este trabajo se consideró que cada ciclo inicia cuando el cráter queda destruido y durante varias décadas la lava asciende hasta formar un domo en el cráter. Posteriormente se forman derrames de lava asociados con flujos merapi intercalados con caída de ceniza y flujos piroclásticos de erupciones vulcanianas, seguidas por periodos de baja actividad hasta que una erupción violenta abre el cráter, expulsa el domo y genera caída de tefra a 725 km y flujos piroclásticos a más de 15 km de distancia. Cada ciclo finaliza con una erupción pliniana con un VEI 4-5 (Figura 2). Los flujos merapi se forman por los bloques de lava calientes al ir descendiendo cuando se desploma un frente de derrame o domo. Los flujos merapi han sido frecuentes en el Volcán de Colima.

2.2. Ciclo I (-1611)

El ciclo I incluye erupciones con tefra registradas desde 1576 (Figura 2). Esta erupción generó caída de ceniza acompañada de flujos piroclásticos y se mencionó que murió gente joven, pero posiblemente estuvo asociada a la epidemia que ocurrió en la misma época y causó la muerte de más de la mitad de la población en 22 villas de Colima (Tello, 1651; Pérez de León, 1789; Ciudad del Real, 1976). En 1579, 1585, 1587, 1589 y 1590 también hubo emisiones de ceniza pero en la erupción de 1585 se menciona que la nube se dispersó al noreste a 220 km y ocasionó oscuridad en los alrededores. También se reportó la muerte de ganado y los pastos fueron cubiertos (Tello, 1651; Mota Padilla, 1742). En 1602 se registró actividad fumarólica (Bretón et al., 2002). Durante 1606 hubo una nube de ceniza que se dispersó al este-noreste sobre Michoacán a 200 km del volcán y provocó oscuridad en los alrededores (Tello, 1651). En 1611, una erupción explosiva produjo lapilli, cenizas y “escorias”. Medina (1983), también mencionó flujos piroclásticos durante esta erupción y Martín Del Pozzo et al., (1995a), consideraron que dicha erupción pudo ser similar a la de 1818 y 1913.

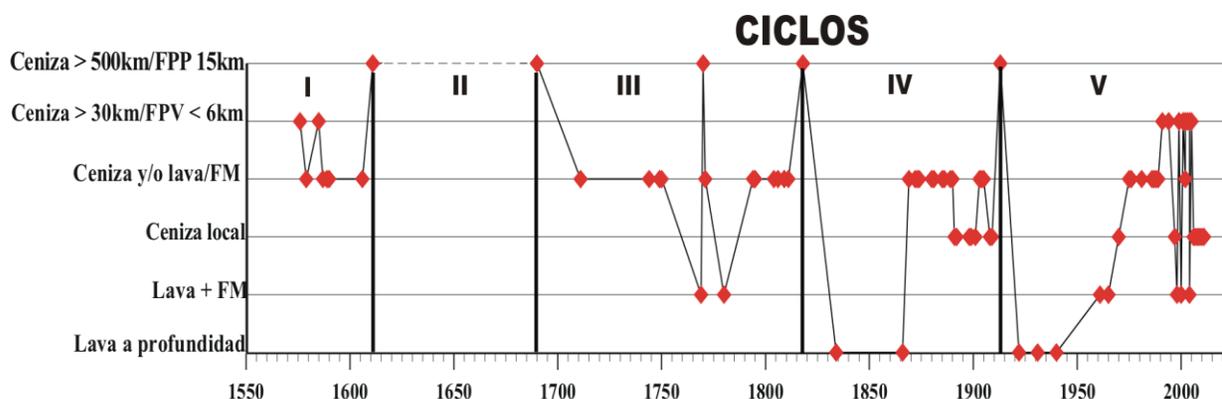


Figura 2. Registro de la actividad volcánica basada en Tello, 1651; Pérez de León, 1789; Mota Padilla, 1742; Barcena, 1887; Puga, 1889; Vizcarra, 1891; Arreola, 1915; Starr y Arreola 1903; Díaz, 1906; Waitz, 1932; Mooser, 1961; Thorpe et al., 1977; Luhr y Carmichael, 1982; Medina, 1983; Flores, 1987; Martin Del Pozzo, et al., 1988; 1995b; De la Cruz, 1993; Vizcaino, 1993; García Acosta et al., 1996; Saucedo, 1997; Bretón et al., 2002; Reyes et al., 2002; Zobin et al., 2002; Navarro et al., 2003; GVN, 1988; GVN, 1993, GVN, 2000, GVN, 2001. FM: Flujos merapi. FPV. Flujos Piroclásticos Vulcanianos. FPP: Flujos Piroclásticos Plinianos.

2.3. Ciclo II (1611-1690)

En 1623 se reportó caída de ceniza en Zacatecas y causó oscuridad y cubrió los techos, calles y campos dejando un olor a quemado, se reportó que la nube venía del NNE a 17 km de Zacatecas, pero la fuente de emisión aún se desconoce (Tello, 1651). No fue hasta 1690 que se documentó otra erupción explosiva de tipo peleano junto con fuerte actividad sísmica (Medina, 1983). Martin Del Pozzo et al., (1988) consideraron a esta erupción como la culminación del segundo ciclo. Las relaciones de las encomiendas de la Nueva España del siglo XVI se quemaron, por lo cual se encontró poca información de este período.

2.4. Ciclo III (1690-1818)

Durante este ciclo eruptivo se registró en 1711 una emisión de ceniza que llegó a Guadalajara (Puga, 1889); en 1744 hubo caída de ceniza sobre la ciudad de Colima, al sur del volcán. En este mismo año produjo un lahar (Bretón et al., 2002). En 1749 se formaron derrames de lava (Waitz, 1932) y en 1750 el volcán continuó activo pero se desconocen los detalles (García Acosta et al., 1996). Durante 1769, hubo derrames de lava que se observaron desde Colima y en 1770, una explosión precedida de temblores y fuertes ruidos formó una columna densa de ceniza y flujos piroclásticos. La ceniza que provocó oscuridad

en las zonas cercanas, cayó en Guadalajara durante 3 días y llegó a Durango, 550 km al N del volcán. Los flujos piroclásticos rellenaron la Barranca La Joya sobre el flanco suroeste, calcinaron plantas, mataron ganado, aves y otros animales (Pérez de León, 1789). La duración de la erupción fue de 3 horas y se consideró una erupción vulcaniana con un VEI 3-4.

En 1771, se registró caída de ceniza y sismicidad (Arreola 1915) y en 1780 hubo temblores, ruidos y flujos de lava que descendieron por el flanco sur del volcán (Pérez de León, 1789). Durante 1794 hubo una explosión que se sintió a 50 km (Bretón et al., 2002), y en 1795 se reportaron lavas y *escorias* (Waitz, 1932; García Acosta et al., 1996).

En 1804 y 1806-1809, se registraron derrumbes de rocas, flujos de lava y caída de ceniza (Bárcena, 1887, Arreola, 1915). En 1811-1815 no se encontraron datos sobre la actividad eruptiva pero identificamos una columna menor a 2 km de altura sobre el volcán en 1816 (López L, 1816). Este periodo eruptivo coincidió con la guerra de la Independencia (1810-1821).

A principios de 1818 el cráter estuvo obstruido por un domo y el 15 de febrero a las 8 de la noche ocurrió una explosión que se escuchó en Ciudad Guzmán y León a 26 y 275 km del volcán y alarmó a la población (Waitz, 1932). La nube de ceniza *cubrió la luna*, produjo oscuridad y se desplazó al este-noreste (Arreola, 1915; Waitz, 1932). Dos horas después se escuchó un ruido fuerte (10:00 p.m. hora local). Los flujos piroclásticos bajaron por la Barranca del Muerto al sur del volcán y calcinaron los bosques y al ganado. Los habitantes de San Marcos observaron el descenso de los flujos piroclásticos (Arreola, 1915; Waitz, 1932). La mayor emisión del material de caída fue entre 8 y 10 de la noche (Arreola, 1915). En Ciudad Guzmán el peso de la ceniza causó el colapso de algunos techos y otros tuvieron que limpiarse con palas. La ceniza llegó a Guadalajara (140 km), León (275 km), Guanajuato (310 km), Zacatecas (384 km), San Luis Potosí (425 km), Querétaro (345 km) y Ciudad de México (470 km). Esta erupción, dejó un cráter abierto e irregular en forma de embudo (Vizcarra, 1891; Waitz, 1932). La erupción de 1818 fue considerada de tipo

peleano por Bárcena, 1887; Waitz, 1932; Martin Del Pozzo et al., 1988; Luhr y Carmichael, 1990.

2.5. Ciclo IV 1818-1913

Después de la erupción de 1818, en 1866, Dollfus y Montserrat, obtuvieron un diámetro de 500 m por 450 m, una profundidad máxima de 230 m y una mínima de 125 m debido a la base irregular del fondo del cráter (Bárcena, 1887). En 1869, se abrió una nueva boca formándose *El Volcancito* en el lado NE del Volcán (Arreola, 1915). La actividad asociada al Volcancito produjo emisiones de ceniza y lava y se registró hasta 1873 (Morentin, 1873, Arreola, 1915).

Se registraron emisiones de gas y caída de ceniza en 1872 que salieron del cráter principal (Arreola, 1915; Waitz, 1932). En 1873, se reportó una erupción acompañada de relámpagos, derrames de lava y una columna de ceniza hacia el sur del volcán que produjo caída en Colima (Arreola 1915). En 1874 la actividad fue similar al año anterior (Martin Del Pozzo et al., 1995a) pero entre 1875 y 1876 el volcán se mantuvo en relativa calma (Arreola, 1915). Durante 1877, se registró actividad fumarólica; pero en 1879 un temblor y un ruido subterráneo precedieron a una columna de ceniza y lava, la erupción causó nerviosismo en los habitantes (García Acosta et al., 1996; Martin Del Pozzo et al., 1995a). En 1880 el volcán continuó activo y a finales de año, el domo rebasó el borde del cráter y hubo flujos merapi que acompañaron al derrame de lava (Waitz, 1932). Durante 1881 se registraron flujos de lava y caída de ceniza en Ciudad Guzmán. En 1882, los temblores y ruidos subterráneos sobre el volcán atemorizaron a la población (García Acosta et al., 1996).

Entre 1883-1884 el volcán estuvo en relativa calma (Arreola, 1915). A finales de 1885 se registró una explosión acompañada de varias detonaciones, una onda de choque y temblores precedieron a una columna de ceniza que se desplazó al sur del volcán. Los flujos merapi descendieron por el lado oeste-suroeste del volcán y ocasionaron incendios que se extinguieron dos semanas después, la erupción duró media hora (Arreola, 1915). La actividad fue similar durante 1886, La ceniza cubrió calles, azoteas y árboles de Colima, los

flujos merapi descendieron por la Barranca de la Lumbre. Durante las explosiones se destruyó parcialmente el domo y se abrió una nueva boca en el lado suroeste del cráter (Bárcena, 1887, Arreola, 1915). En 1889, también se registraron varias explosiones con fuertes detonaciones, truenos y temblores que precedieron a las columnas de ceniza y flujos de lava (Bárcena, 1887). Los temblores dañaron las casas de los alrededores y las lavas incendiaron los bosques (Puga, 1889, Arreola, 1915). Las nubes de ceniza se desplazaron al noreste y hubo registros de caída en Tecolotlán por 8 horas; San Gabriel se oscureció, mientras que las calles y azoteas se cubrieron de ceniza (Arreola, 1915). Durante 1890 otra explosión precedió a una columna de ceniza acompañada de rayos, la nube se desplazó al noreste produjo caída de lapilli en Ciudad Guzmán, Silao, Guanajuato y San Gabriel (Arreola, 1915). Hubo ceniza en 1891-1892 que cayó en Ciudad Guzmán (*op.cit*). En 1893, también hubo emisiones de ceniza (Díaz, 1906).

Durante 1894-1895, se registró salida de vapor y en 1896 se produjo un flujo Merapi (Díaz, 1906; Martin Del Pozzo et al., 1988). La actividad fue similar en 1897, aunque se registró caída de ceniza en Tonila (Díaz, 1906). En 1898, se menciona una columna de ceniza y bloques incandescentes (balísticos) que ocasionaron incendios en el lado del Nevado (Díaz, 1906; García Acosta et al., 1996).

En 1899 solo se reportaron emisiones de vapor. Entre 1900-1902 hubo columnas pequeñas con caída de ceniza local pero en 1903, una explosión acompañada de truenos destruyó parcialmente el domo y formó un cráter ovalado con un diámetro de 50 m por 30 m. Los flujos merapi descendieron por los flancos y las cenizas cayeron en Ciudad Guzmán, Tuxpan y Colima, cubriendo calles y campos (Starr y Arreola, 1903). En el mismo año otra explosión produjo caída de ceniza en Guadalajara y Uruapan (*op.cit*). Durante 1904-1905, las explosiones fueron seguidas por flujos merapi (derrames con bloques incandescentes) que descendieron por el lado suroeste del volcán, ocasionando *susto* en la población (Díaz, 1906). En 1908 una explosión causó caída de ceniza en Armería (Waitz, 1932). La actividad fue similar en 1909, una explosión causó la destrucción parcial del domo, produjo caída de lapilli y ceniza al este-noreste del volcán y un derrame descendió por el lado este.

La explosión formó dos cavidades en el domo, en este mismo año también se registraron lahares hacia el lado sur (*op. cit*).

Entre 1909-1913 se registraron ruidos subterráneos, actividad sísmica y fumarólica (Figura 3A, 3B). En este período dio inicio la Revolución Mexicana y las barrancas del Volcán de Colima fueron una zona estratégica militar importante.



Figura 3A. Volcán de Colima, 1909 (Waitz, 1915).



Figura 3B. Vista de los volcanes Colima y Nevado en 1912 (Cortesía del Archivo Histórico del Municipio de Colima).

El 18 de enero 1913 el volcán inició con una serie de explosiones que generaron columnas de ceniza que se dispersaron al noreste (Saucedo et al., 2010). Estas erupciones continuaron al día siguiente (Figura 4) y el 20 de enero una explosión destruyó el domo central (Figura 5). Se formó una columna alrededor de 23 km de altura y la nube volcánica se dirigió al nor-noreste del país (Waitz, 1932; Saucedo et al., 2010).

En Ciudad Guzmán el espesor de la ceniza estimado fue de 15 cm; Guadalajara tuvo 0.5 cm; San Luis Potosi, Aguascalientes, Zacatecas y Saltillo 0.01 cm (Waitz, 1932). En la tarde del mismo día, nubes ardientes bajaron por el noroeste y sur del Volcán y se encajonaron por las barrancas (Waitz, 1932). Los flujos de bloques y cenizas alcanzaron distancias de 15 km del cráter (*op.cit*).

La erupción de 1913 destruyó el domo dejando un cráter irregular con un diámetro de 400 m (Figura 6). En los depósitos se observan lapilli y cenizas compuestas por líticos y pómez.

Las nubes ardientes y los depósitos de caída de esta erupción rellenaron las barrancas y suavizaron las laderas y el material rocoso suelto que quedó en la cima del volcán se derrumbó hacia las partes bajas (Waitz, 1932).



Figura 4. Columna volcánica del 19 de enero de 1913 (Cortesía del Archivo Histórico de Colima).

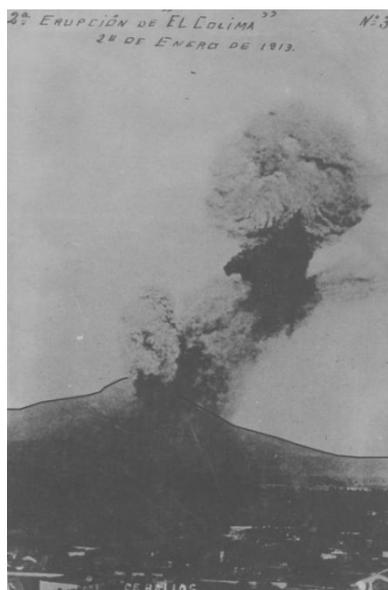


Figura 5. Segunda erupción del 20 de enero de 1913, se observa la columna de ceniza (Cortesía del Archivo Histórico de Colima).



Figura 6. Cráter destruido con bordes irregulares sobre la cima después del 20 de enero de 1913 (Waitz 1915).

2.6. Ciclo V (1913-)

En 1922 Friedländer observó que la lava se encontraba a 300 m de profundidad (Waitz, 1932), para 1931 la lava subió a 50 m de profundidad, en 1941 la lava seguía ascendiendo desde el interior del cráter (Figura 7); hasta que en 1957 se obstruyó el cráter con un

domo irregular. En este mismo año se registró una columna de vapor precedida por ruidos subterráneos y temblores locales (Mooser, 1961).

En 1961-1962 un derrame de lava descendió desde el cráter hacia el noroeste, norte y noreste del cráter (Figura 8) (Thorpe et al., 1977).



Figura 7. Lava en el interior del cráter, vista desde el sureste, 1941 (Mooser, 1961).

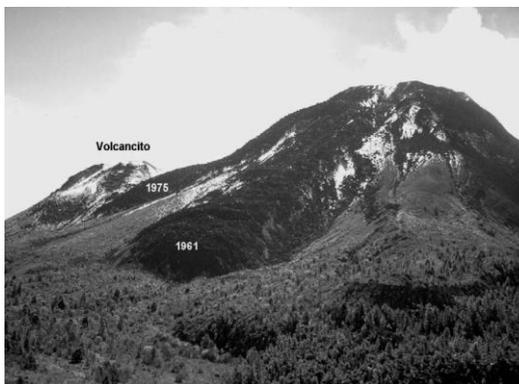


Figura 8. Desbordamiento del cráter, derrames de lava de 1961 y 1975 (Luhr y Carmichael, 1990).

En 1965-1970, la actividad sísmica, los derrumbes y ruidos precedieron a varias columnas de ceniza (Vízcaíno, 1993). Entre 1975-1976, se produjeron dos derrames de lava y flujos merapi que bajaron por el sureste (Figura 8) y causaron incendios, así como caída de ceniza local (Thorpe et al., 1977). En 1981-1982, también se formó un derrame de lava que se desplazó por el flanco sur con flujos merapi (Martin Del Pozzo et al., 1988). Durante 1986, una columna de ceniza fue acompañada de un temblor que se sintió en San Marcos a 14 km del cráter (Vízcaíno, 1993) y en 1987, una explosión produjo un pequeño cráter de 100-150 m de diámetro y 30-40 m de profundidad sobre el lado este del cráter (Flores, 1987).

Durante 1988, hubo actividad fumarólica y pequeñas explosiones que ocasionaron caída de ceniza local (GVN, 1988). Entre 1989-1990 se registraron derrumbes y salida de gases (Vízcaíno, 1993) pero en 1991, se formó un nuevo lóbulo en el domo que alcanzó el borde suroeste del domo antiguo. Su crecimiento causó el colapso parcial del domo central en el lado sur y flujos de bloques y cenizas que descendieron por la Barranca El

Cordobán con un alcance de 4 km (Rodríguez Elizarrarás et al., 1991; González Pomposo et al., 1993). El avance de la lava continuó hasta alcanzar 30 m de espesor y 3 km de largo sobre la Barranca del Cordobán (Bretón et al., 2002). El domo formado en 1991 fue destruido en 1994 por una explosión que formó un cráter de 135 m de diámetro y 40 m de profundidad y produjo ceniza hasta 15 km al oeste; las bombas y balísticos formaron cráteres de impacto a 2 km del cráter y flujos piroclásticos descendieron por la Barranca del Cordobán (Saucedo, 1997; Reyes et al., 2002).

En 1997 la sismicidad y los derrumbes disminuyeron después de las explosiones (Martin Del Pozzo et al., 2002), pero a finales de 1998, el crecimiento de un nuevo domo y el aumento de la sismicidad ocasionó que las autoridades evacuaran a la población de La Yerbabuena y Juan Barragán, ubicadas a 10 km y 7 km del cráter. Un nuevo flujo de lava acompañado por flujos merapi descendió por el suroeste; la lava continuó fluyendo hasta que se colapsó el frente de lava y formó flujos merapi que alcanzaron 4.8 km en la Barranca del Cordobán (Navarro et al., 2002; Saucedo et al., 2002). A principios de 1999, una explosión que se escuchó en Ciudad Guzmán y Colima destruyó el nuevo domo; la columna de ceniza que alcanzó una altura de 3 a 4 km, se desplazó al este y al sur del volcán (Bretón et al., 2002). Los balísticos de 2 m de diámetro llegaron a 4 km al norte y noreste del volcán formando cráteres de impacto. A mediados de año otra explosión fue escuchada en Colima, y formó una columna de ceniza de 6.5 km de altura y fue seguida por flujos piroclásticos que descendieron por las Barrancas de La Lumbre y El Cordobán. Los balísticos llegaron a 4.5 km y ocasionaron incendios en las partes altas del volcán. En julio del mismo año, después de 13 horas de sismicidad, una erupción formó una columna de cenizas de 10 km de altura que produjo caída en Zapotitlán de Vadillo 21 km al oeste del volcán. Los flujos de bloques y cenizas que descendieron por las barrancas llegaron a 3.3 km al sur y suroeste, sepultaron la vegetación y cubrieron al flujo de lava 1998 (Saucedo et al., 2002, Macias et al., 2006). La explosión produjo un cráter con un diámetro de 230 m y una profundidad de 70 m a 80 m. Durante el verano del mismo año los flujos piroclásticos fueron removilizados como lahares calientes que siguieron la misma dirección sur-suroeste y explosiones pequeñas continuaron por varios meses (Bretón et al., 2002).

Durante el 2000, la lava fluyó por las Barrancas de Beltrán, Durazno y Cafecito acompañada de flujos merapi (GVN, 2000). Durante la temporada de lluvias, los flujos fueron removilizados como lahares y se dañó el puente de La Lumbre sobre la carretera estatal, dejando incomunicadas a las comunidades de San José del Carmen y La Becerrera. En 2001, otra erupción produjo caída de ceniza en San Marcos y Tonila, nuevos cráteres de impacto sobre el lado norte y flujos de bloques y cenizas hacia el suroeste. También se registró la formación de un nuevo domo (GVN, 2001). A principios de 2002 se registró el crecimiento del domo y se formó un derrame de lava que fluyó sobre el lado sur, seguido de flujos piroclásticos (GVN, 2002). También hubo derrumbes desde la parte frontal del derrame, por lo que las autoridades evacuaron del 18 de mayo al 3 de junio a varios pueblos del suroeste y sureste. La extrusión de lava continuó hasta principios de 2003.

Durante 2003 se formó una columna de ceniza de 3 km de altura acompañada de flujos de bloques y cenizas; la nube viajó al suroeste y noroeste y se reportó caída de ceniza en El Grullo 60 km al noroeste del volcán (GVN, 2003). Las emisiones de ceniza continuaron durante el año produciendo caída en Ciudad Guzmán (*op.cit*). En 2004 creció un nuevo domo y se formó un derrame de lava de 2 km de largo acompañado de flujos de bloques y cenizas; el flujo de lava descendió por el lado oeste-noroeste y alcanzó 1.8 km y 0.6 km de largo.

Durante 2005, se registraron ocho flujos piroclásticos y columnas de ceniza de 2 a 8.5 km de altura por encima del cráter (Figura 9). Los flujos piroclásticos fueron removilizados en forma de lahares en la época de lluvias.

Las explosiones disminuyeron en 2006, aunque hubo emisiones de vapor alternadas con pequeñas columnas de ceniza (G. Reyes, comunicación personal, 2006). Desde febrero de 2007, el domo siguió creciendo y se presentaron pequeñas emisiones de vapor y ceniza local. En 2010 el domo rebasó el nivel del cráter y se inclinó hacia el flanco occidental (Figura 10). Las dimensiones del domo se estimaron en 60 m altura y 270 m diámetro y 2.3 millones de m³ (Reyes y Navarro, 2010). En 2011 el domo siguió creciendo lentamente y formó un lóbulo en el lado oeste-suroeste del cráter, se registraron ruidos, derrumbes,

pequeñas emisiones de vapor y caída de ceniza local. En junio del mismo año, una explosión produjo flujos piroclásticos de bloques y cenizas que descendieron por el lado oeste (N.Varley, comunicación personal, 2011).

De acuerdo con el análisis histórico, el Volcán de Colima presenta una erupción pliniana alrededor de cada 100 años y la última ocurrió en 1913. La actividad actual es similar a los precursores de 1818 y 1913 porque se presentan erupciones intermitentes efusivas con derrames de lava y flujos merapi intercaladas con eventos vulcanianos acompañados de flujos piroclásticos y caída de ceniza. Las erupciones se vuelven más violentas conforme se va acercando el final del ciclo; pero antes de presentarse la erupción pliniana hay una etapa de relativa quietud con solo emisiones de gas, ruidos y derrumbes que dura varios años. Actualmente existe un domo en el cráter que lentamente y desde 2007 la actividad se ha reducido a emisiones de gas y ocasionalmente emisiones de ceniza local, además de derrumbes y ruidos. El posible escenario futuro es el de un evento explosivo pliniano que puede ocasionar efectos regionales.

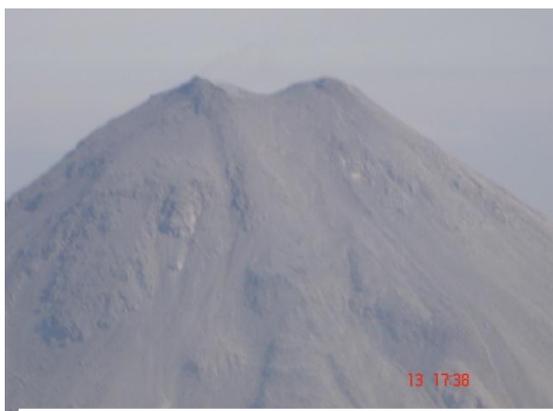


Figura 9. Vista del cono desde el lado norte, se observa la forma de embudo del cráter, 2005.



Figura 10. Cráter ocupado por domo inclinado hacia el oeste, 2010.

2.7. Referencias

- Arreola, J. M. (1915). Catálogo de las erupciones antiguas del Volcán de Colima. Memorias de la Sociedad Antonio Alzate. 32:443-481
- Bárcena, M. (1887). Informe sobre el estado actual del Volcán de Colima. Anales del Ministerio de Fomento, México. 328-365

- Bretón, M., Ramírez J, Navarro C. (2002). Summary of the historical eruptive activity of Volcán de Colima, Mexico 1519-2000. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 117:1-2:21-46
- Ciudad del Real A (1976). *Tratado curioso y docto de las grandezas de la Nueva España*. Universidad Nacional autónoma de México. México. 272 pp
- De la Cruz, S. (1993). Random patterns of activity of Colima Volcano, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 55:51-68
- Díaz S. (1906). *Efemérides del Volcán de Colima (1893-1905)*. Secretaría de Fomento, México. 168 pp
- Flores J. A. (1987). *Las erupciones del Volcán de Colima*. Colección: Cuaderno de difusión científica. Instituto de Geografía y Estadística. Universidad de Guadalajara. 10:7-52
- García Acosta V., Suárez R. G (1996). *Los sismos en la historia de México*. Fondo de Cultura Económica. México. 718 pp
- González Pomposo., Martín Del Pozzo A.L., Panohaya A.J., Gante González J.A. (1993). Estudio de la sismicidad y deformación del Volcán de Colima durante la crisis de abril de 1991. *Geofísica Internacional*. 32:4:671-682
- GVN. (1988). Global Volcanic Program. *Bulletin of the Global volcanism Network*. No. 13
<http://www.volcano.si.edu/world/volcano>
- GVN. (1993). Global Volcanic Program. *Bulletin of the Global volcanism Network*. No. 18
- GVN. (2000). Global Volcanic Program. *Bulletin Global Volcanism Network*.
<http://www.volcano.si.edu/reports/bulletin/>
- GVN. (2001). Global Volcanic Program. *Bulletin Global Volcanism Network*.
<http://www.volcano.si.edu/reports/bulletin/>
- GVN. (2002). Global Volcanic Program. *Bulletin Global Volcanism Network*.
<http://www.volcano.si.edu/reports/bulletin/>
- Smithsonian Institution. (2003). *Colima. Bulletin Global Volcanism Network*.
<http://www.volcano.si.edu/reports/bulletin/>
- López López, M. (1816). *Plano topográfico de la laguna de Chapala, pueblos y haciendas de su circunferencia*", Grabado en cobre 36 x 55 cm. En Mayer R. L., Rubial G. A., y Jiménez, C. G. (1994). *México ilustrado. Mapas, planos grabados e ilustraciones de los siglos XVI al XIX*. Fomento cultural Banamex, México. 265 pp
- Luhr, J. F., Carmichael, I. S. E. (1982). The Colima volcanic complex, Mexico: Part III. Ash and scoria-fall deposits from the upper slopes of Volcán Colima: *Contrib. Mineral. Petrology* 80:262-275

- Luhr, J.F., Carmichael, I.S.E. (1990). Geology of Volcán the Colima. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología. 107:101-107
- Macias, J. L., Saucedo, R., Gavilanes, J. C., Varley, N., Velasco, S., Bursik, M., Vargas, V., Cortés, A. (2006). Flujos piroclásticos asociados a la actividad explosiva del Volcán de Colima y perspectivas futuras. *GEOS*. 25:3:340-351
- Martin Del Pozzo, A., L y Romero, M. V. H. (1988). El Volcán de Colima: un estudio sobre riesgo. *Litosfera*. 2:1:43-55
- Martin Del Pozzo, A. L., Sheridan, M. Barrera, D., Lugo, H. J y Vázquez, S. L. (1995a). Potencial hazards from Colima Volcano. *Geofísica Internacional*. 34:4:363-376
- Martin Del Pozzo, A. L., Sheridan, M., Barrera, D., Lugo, H. J.L., Vázquez, S.L. (1995b). Mapa de peligros Volcán de Colima. Universidad Nacional autónoma de México
- Martin Del Pozzo, A. L., Fonseca, R., Barrera, D. (2002). El Volcán de Colima, La erupción de 1913. En: Lugo HJ, Inbar M (ed) *Desastres Naturales en América Latina*. Fondo de Cultura Económica, México. 85-100
- Medina, M. F (1983). Analysis of the eruptive history of the Volcán de Colima, México (1560-1950). *Geofísica Internacional*. 22:2:157-178
- Mooser, F. (1961). Los volcanes de Colima. *Boletín del Instituto de Geología*. México. 61:49-71
- Morentin, M. (1873). Periódico el Pigmeo, semanario independiente. Colima México. p.8
- Mota Padilla, M. (1742). *Historia de la Conquista de la Nueva Galicia 1742*. T.II. Guadalajara. 310 pp
- Navarro, O. C., Gavilanes, J. C., Cortés, A. (2002). Movement and emplacement of lava flows at Volcán de Colima, México: November 1998-february 1999. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 117:1-2:155-167
- Navarro, O., Cortes, C. A., Téllez, A. J. A. (2003). Mapa de Peligros del Volcán de Colima. Universidad de Colima. México
- Pérez de León, J. M. (1789). Descripción del Distrito de Colima y del Corregimiento de San Miguel Xilotlán en 1789. *Documentos para la historia de Colima, Siglos XVI-XIX*. México. 252 pp
- Puga, G.B. 1889. La ultima erupción del Volcán de Colima. *Memorias de la Sociedad Antonio Alzate*. Mexico. 3:97-102.
- Reyes, D. G., De la Cruz, R. S. (2002). Experience in the short-term eruption forecasting at the Volcán de Colima, México and public response to forecasts. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 117:121-127
- Reyes, G., Navarro, C. (2010). Arroja Volcán de Colima material incandescente. 19 de Octubre. Milenio.

- Robin C., Camus G., Gougaurd A (1991). Eruptive and magmatic cycles at Fuego de Colima Volcano (Mexico). *Journal Geothermal Research*. 45:209-225
- Rodríguez Elizarrarás, S.R., Siebe, C., Komorowski, J.K., Espíndola, J.M., Saucedo, R. (1991). Field observations of pristine block and flow deposits emplaced April 16-17 1991 at Volcán de Colima, México. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 48:399-412
- Saucedo, R. (1997). Reconstrucción de la Erupción de 1913 del Volcán de Colima. Tesis de maestría. Posgrado en Ciencias de la Tierra. Instituto de Geofísica. Universidad Nacional Autónoma de México. 185 pp
- Saucedo, R., Macías, J. L., Bursik, M. L., Gavilanes, J.C., Mora, J.C., Cortés, A. (2002). Emplacement of pyroclastic flows during the 1998-1999 eruption of Volcán de Colima, México. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 117:1-2:129-153
- Saucedo, R., Macías, J. L., Gavilanes, J. C., Arce, J. L., Komorowski, C., Gardner, J. E., Valdez-Moreno, G. (2010). Eyewitness, stratigraphy, chemistry, and eruptive dynamics of the 1913 Plinian eruption of Volcán de Colima, México. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 191:149-166
- Starr, F., y Areola, J.M. (1903). The recent eruptions of Colima Volcano. *Journal of Geology*. 11:749-761
- Tello, F. A. (1651). Libro segundo de la Crónica Miscelánea de la conquista espiritual y de la Santa Provincia de Xalisco en el Nuevo Reino de la Galicia y Nueva Vizcaya y Descubrimiento del Nuevo México. Guadalajara. 886 pp
- Thorpe, R. A., Gibson I. L. Vízcaíno, J. S. (1977). Andesitic pyroclastic flows from Volcán de Colima. *Nature*. 265:724-725
- Vízcaíno, J. S. (1993). Notas sobre el Volcán. *Geofísica Internacional* 32:4:699-701
- Vizcarra, I. (1891). Pequeña cartilla histórica de Colima. Colima. 100 pp
- Waitz, P. (1915). Der gegenwartige Zustand der mexikanischen Vulkanen und die letzte eruption des Vulkans von Colima. *Z. Vulcanol*. Vol. I. 247 pp
- Waitz, P. (1932). Datos históricos y bibliográficos acerca del Volcán de Colima. *Memoria de la Sociedad Antonio Alzate* 53:349-384
- Zobin, V.M., Luhr, J.F., Taran, Y.A., Breton, M., Cortés, A., De la Cruz-Reyna, S., Dominguez, T., Galindo, I., Gavilanes, J., Muñiz, J., Navarro, C., Ramírez, J., Reyes, G., Ursua, M., Velasco, J., Alatorre, E., Santiago, H. (2002). Overview of the 1997-2000 activity of Volcán de Colima, México. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 117:1-19

CAPITULO 3. COLUMNAS ERUPTIVAS

Las columnas eruptivas se forman durante las erupciones por la suspensión turbulenta de piroclastos calientes y gases volcánicos que se mezclan con el aire. Las erupciones plinianas pueden producir columnas sostenidas que alcanzan 50 km de altura y llegan a tener una descarga de magma de 106 a 109 km s⁻¹ (Carey y Sigurdsson, 1989). La erupción volcánica es un fenómeno que se desencadena por el aumento de presión en el interior del sistema volcánico debido a la inyección de nuevo magma o sobresaturación de volátiles y durante su enfriamiento se forma una fracción de gas (Sparks, 1986; Carey y Sigurdsson, 1989). Los volátiles disueltos en el magma pueden modificar la temperatura de fusión, cristalización, viscosidad y grado de explosividad (Cas y Wright, 1987). La solubilidad de los volátiles es controlada por la presión de confinamiento, presión ejercida a una profundidad determinada por el peso de las rocas y fluidos que las saturan y disminuye progresivamente a medida que el magma se acerca a la superficie (Cas y Wright, 1987; Francis 1998; Francis y Oppenheimer, 2004). Las erupciones explosivas fragmentan el magma y están asociadas a procesos de separación de volátiles de origen magmático o incorporación de agua en el magma, expulsando al exterior fragmentos piroclásticos (Sparks, 1986; Bursik, 1998).

3.1. Estructura de las columnas eruptivas

Las columnas volcánicas de erupciones explosivas presentan 3 regiones: de chorro, convectiva y región de difusión horizontal o sombrilla (Sparks, 1986; Rosi, 1998; Ishimine, 2006).

La **región de chorro**, es la zona de impulso conocida también como la fase de jet y corresponde a la parte basal de la columna (Figura 11). Se caracteriza por ser la más densa y alcanzar grandes velocidades y desaceleraciones. En esta región, la mezcla de gases y partículas se acelera a grandes velocidades debido al ascenso del magma, la vesiculación y el contenido de fragmentos (Sparks, 1986). La velocidad de salida de la columna volcánica depende de la presión en el nivel de fragmentación del magma y del tipo de erupción; en eventos vulcanianos o plinianos puede variar de 400 a 600 m/s (Wilson, 1980; Sparks, 1986). En magmas andesíticos las columnas plinianas ascienden a velocidades por arriba de

500ms⁻¹ (1800 kmh⁻¹) con temperaturas de 1000 y 1200°C. Esta región ocupa sólo una pequeña fracción de la altura total de la columna, puede alcanzar menos de 1 km en erupciones strombolianas, 1.5 km en erupciones vulcanianas y hasta 4.5 km en erupciones plinianas (Sparks, 1986). Al inicio de la erupción, antes de incorporarse el aire atmosférico, la temperatura de la columna es superior a la ambiental y hace que ascienda a diferentes velocidades. Sparks, (1986) midió una velocidad inicial de 200 m/s para la erupción del volcán Santa Helena. Woods, (1994), calculó el ascenso de la zona de impulso para la misma erupción y obtuvo velocidades iniciales de 100 a 300 m/s-1 con altura de 0.5-5 km.

La *región convectiva*, es la parte intermedia entre la zona de impulso y difusión horizontal de la columna volcánica que se desarrolla en la troposfera que es la capa atmosférica más densa, en ella se concentran $\frac{3}{4}$ partes del aire atmosférico y contiene casi todo el vapor de agua. La temperatura disminuye aproximadamente 0.6°C por cada 100 m en aire húmedo y 1°C cada 100 m en aire seco (Ayllon, 2003; Ahrens, 2005). En la troposfera se producen los movimientos convectivos o corrientes ascendentes de aire debido al calentamiento de las capas bajas del aire, lo que hace que sea una capa muy inestable. Esta inestabilidad origina la formación de nubosidad y tormentas eléctricas entre 5500 y 7600 m de altitud, así como partículas de hielo aproximadamente a 7600 m (Ahrens, 2005). Mayberry et al., (2002), identificaron que una nube volcánica puede ocasionar la formación de hielo y nubes meteorológicas por el contenido elevado de agua en la troposfera (Rose et al., 1995).

Una columna convectiva de 15 km de altura del Volcán Soufriere Hills en 1997, entró a la zona de la troposfera y la transferencia de calor y evaporación elevada del mar formó nubes meteorológicas de origen volcánico que se integraron a la nube de ceniza y se produjo lapilli acrecionario (Withman et al., 2005). La interacción de los gases de la columna con el agua meteórica en forma de lluvia, puede influir en la separación del SO₂ y acelerar la sedimentación de la ceniza (Mayberry et al., 2002). La disgregación de ceniza y SO₂ fue observada en la erupción de abril de 1982 en el Chichón (Schneider et al., 1999); en el Volcán Hudson en agosto de 1991 y en el Volcán Soufrière en diciembre de 1997 (Mayberry et al., 2002).

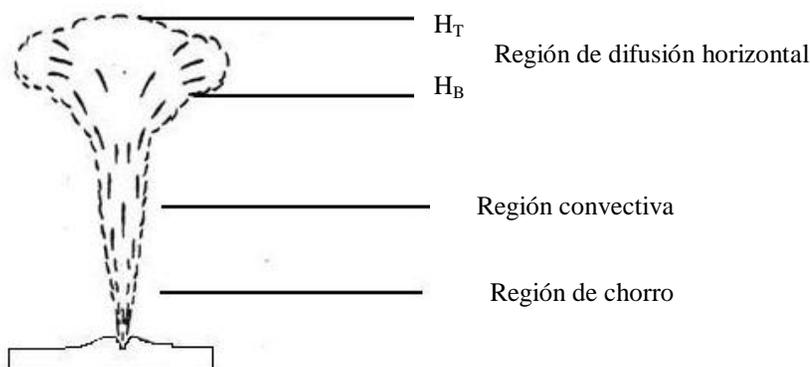


Figura 11. Estructura de una columna eruptiva. La región de chorro comprende la parte baja de la columna, la región convectiva de la columna eruptiva permite que las partículas asciendan hasta llegar a la región de difusión horizontal. H_B : Altura base de la zona de difusión horizontal, H_T : Altura total de la columna (modificada de Sparks, 1986).

La zona convectiva de la columna volcánica, durante la erupción puede superar los 10 km de altura (Figura 12) debido a la diferencia de temperatura atmosférica y los productos emitidos (Sparks, 1986, Cas y Wright, 1987; Wiesner et al., 1996). El ascenso de la columna y el contenido de humedad en la troposfera, permite que la transferencia de calor sea alta y genere la condensación del vapor de agua y en ocasiones pueda alcanzar el punto de congelamiento (Woods et al., 1995). Durante el ascenso turbulento de la columna, el aire atrapado se expande y se reduce la densidad y volumen de la columna debido a la separación y flotabilidad de partículas de la parte externa de la columna (Sparks, 1986).

La **Región de difusión horizontal o sombrilla**, está por arriba de la región convectiva. La columna eruptiva asciende hasta alcanzar una altura máxima en la que se expande horizontalmente y forma la región de difusión horizontal conocida también como región de sombrilla (Sparks, 1986). Esta región se define por la altura base (H_B) y altura total (H_T) de la región sombrilla de la columna que se extiende lateralmente cuando la densidad aparente del gas y de las partículas es igual a la densidad del ambiente atmosférico con respecto a la altura (Sparks et al., 1997). Las partículas ascienden hasta la altura máxima (H_T) cuando la velocidad de ascenso de la columna es igual a la velocidad límite de caída. La velocidad de caída varía de acuerdo con la forma, diámetro y densidad de la partícula (Sparks, 1986; Folch y Felpeto, 2005), cuando hay un equilibrio térmico entre el ambiente atmosférico y el gas las partículas finas van a estar suspendidas y esto implica que la sedimentación de estas

partículas sea insignificante (Ishimine, 2006). La nube volcánica se extiende de acuerdo con la dirección del viento dominante y arrastra a las partículas que tienen una velocidad límite de caída inferior a la velocidad de ascenso (Sparks, 1986; Carey y Sigurdsson, 1989).

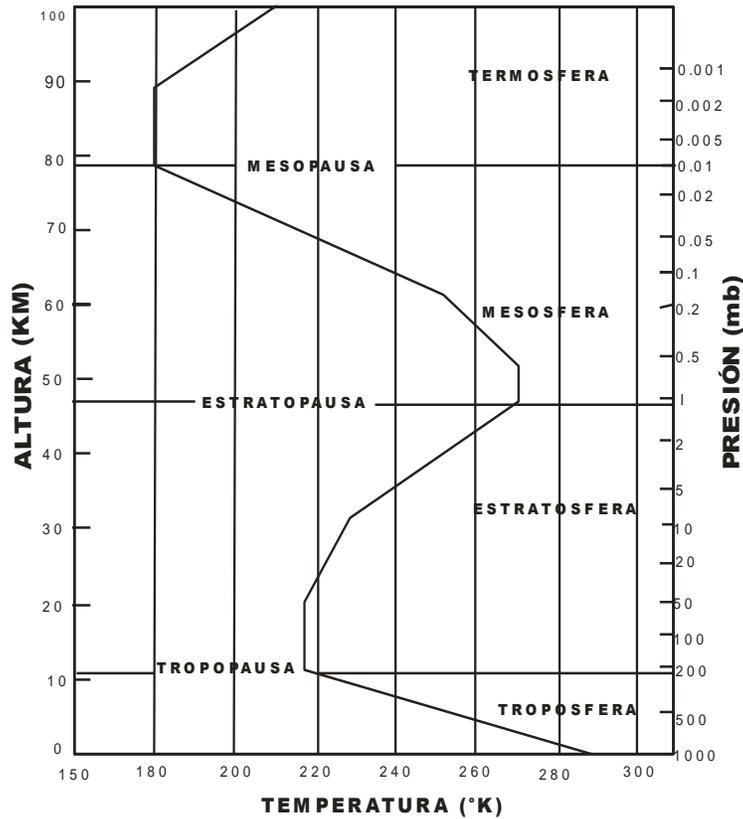


Figura 12. Capas atmosféricas, niveles de presión (mb), altura (km) y temperatura (°K).

3.2. Altura y dispersión de las columnas volcánicas

Las observaciones directas de las nubes volcánicas, así como la modelación experimental y teórica se han realizado desde hace varias décadas para entender como interactúa la descarga del magma con la velocidad vertical y altura de la columna eruptiva (Sparks 1986). La altura de la columna es considerada como una función de la energía térmica inicial y de la estratificación atmosférica, porque si la temperatura inicial de la columna es alta entonces la altura de la columna aumentará (Sparks, 1986; Woods, 1994).

Sparks (1986) propuso un modelo general unidimensional basado en la teoría de la pluma convectiva para entender la conducta de las columnas plinianas. Este autor enfatizó que en

el punto donde se da la densidad neutral se origina la región de difusión horizontal de la nube volcánica y propuso que en esta región se define la altura base (H_B) o punto de densidad neutral y altura total (H_T) que es el ascenso máximo de la columna (Figura 11). También propuso que H_B se puede estimar con el contenido de partículas sólidas y la temperatura de la nube volcánica, mientras que H_T puede obtenerse a partir de la velocidad inicial y la descarga del magma. El material que asciende por encima H_B (zona de flotabilidad) tiene un sobreenfriamiento porque el material que asciende se descomprime (Woods et al., 1995). Sparks (1986) consideró a una atmósfera estratificada y en sus modelaciones tomó como referencia el gradiente de temperatura por debajo de la tropopausa de dos zonas con condiciones de temperatura y altura diferentes: tropical y templada. El modelo propuesto por Sparks (1986) permitió estimar únicamente la altura de la columna para el nivel de densidad neutral sin considerar las características de velocidad del viento. Posteriormente, Carey y Sparks, (1986), propusieron un modelo teórico de convección gravitacional turbulenta aplicado a columnas plinianas para cuantificar la dispersión máxima de las partículas y propusieron un diagrama para calcular la altura considerando la descarga del magma y velocidad del viento transversal, el diámetro y densidad de la pómez (500, 1000 y 1500 kg/m³) y líticos (2500 kg/m³). Con el modelo propuesto calcularon la altura de la columna y velocidad del viento (en el nivel de la tropopausa) de erupciones plinianas del Volcán Santa María (1902) y Santa Helena (1980) con la isopleta máxima de líticos (longitud y ancho medio de la isopleta) y los vientos cruzados. Las isopletas muestran que su geometría está definida por la altura de la columna y velocidad del viento. El modelo de Carey y Sparks, (1986), está limitado a columnas plinianas que pueden transportar partículas de 100 μ m a 10 cm al nivel H_B de la columna.

Por otro lado, Woods et al., (1995), estudiaron la dispersión y sedimentación volcánica por gravedad de las columnas. Una de sus aportaciones fue la identificación de un declive en la parte superior de la columna cuando alcanza H_T , después se produce la sedimentación gravitacional debido a la turbulencia atmosférica. El modelo de Woods et al., (1995), permite predecir la velocidad de propagación de la nube y la evolución temporal de la parte superior de la nube volcánica. A partir de sus modelaciones obtuvieron que la altura de la columna puede rebasar la tropopausa si la tasa es mayor a 10^{-7} kg/s.

La dispersión de las nubes volcánicas también ha sido estudiada en las últimas décadas por observaciones directas, cámaras scanner e imágenes satelitales. Carey y Sparks, (1986) calcularon la trayectoria de las nubes volcánicas del 29 de marzo y 4 de abril del Chichón con imágenes GOES (infrarojo e infrarojo visible) y radiosondeos de Veracruz (3-27 km) y Mérida (3-20 km). La erupción del 29 de marzo se bifurcó porque la parte baja de la columna fue al este-noreste, mientras que la parte alta fue al oeste-suroeste y estuvo controlada por vientos estratosféricos. La forma alargada de la nube volcánica se debió al cambio de dirección y velocidad del viento zonal entre 18 y 20 km de altitud. Las columnas volcánicas del 4 de abril se dispersaron hacia el este y se estimaron alturas de 32 y 29 km (Carey y Sigurdsson, 1986). Mediante las imágenes GOES se pudo identificar que la ceniza fina menor a 100 micras tiene un amplio rango de dispersión controlado por la advección del viento (Woods et al., 1995). Corradini et al., (2010), estudiaron la trayectoria de la nube volcánica de 2008 del Volcán Kasatochi, Alaska; con imágenes AVHRR (infrarrojas), espectro-radiómetros (MODIS) y una sonda atmosférica infraroja e hicieron una comparación de las técnicas para calcular la recuperación de la masa de la ceniza y el SO₂ de la nube volcánica. El estudio comparativo demostró que la ceniza y el SO₂ están presentes al mismo tiempo y al aplicar estas técnicas hay una recuperación de 7.3 a 8.7 μm que corresponde al 30-40 % de las medidas sin corregir. Gu et al., (2005), compararon la trayectoria y masa de la nube de ceniza de la erupción (2001) del Volcán Cleveland, Alaska, con imágenes MODIS, AVHRR y GOES 10. Los resultados de las imágenes mostraron variaciones en los ángulos del cenit, el ángulo para las imágenes GOES 10 fue de 70° mientras que para MODIS y AVHRR fue de 6 a 65°. Esta distorsión angular ocasionó fuertes discrepancias en los cálculos de masa total de ceniza; se calculó una masa total de ceniza de 400 toneladas métricas por pixel (25 km²); pero con los datos de GOES 10 la masa total de la nube fue 3 veces mayor. De acuerdo a sus resultados, los datos de MODIS y AVHRR proporcionaron datos más precisos para la seguir la trayectoria de la nube de cenizas.

3.3. Sedimentación y estimación del volumen

Los estudios de campo son esenciales para estimar el espesor y el volumen de la tefra por

unidad de área. Durante las últimas décadas se han desarrollado modelos semianalíticos y analíticos para entender las formas de sedimentación de las partículas de erupciones plinianas para estimar el volumen, parámetro clave que permite calcular la intensidad y magnitud eruptiva (Huff et al., 1992; Carey et al., 2010). Diferentes métodos han sido desarrollados para poder calcular el volumen de los depósitos plinianos, aunque ha sido difícil estimar el volumen total debido a la nula preservación de los depósitos finos.

El cálculo de volumen para depósitos de caída puede medirse a través de los métodos propuestos por Walker (1980, 1981), Pyle, (1989), Fierstein y Nathenson, (1992), Bonadonna et al., (1998, 2002); Martin Del Pozzo et al., (2008).

Walker, (1980) determinó el volumen total para la pómez Taupo a partir de la extrapolación de la curva resultante obtenida del log del área que encierra cada isopaca vs el log espesor. Sin embargo, consideró cierta incertidumbre en el método de extrapolación porque no se consideró la dinámica de la columna, la intensidad del viento y las variaciones de altura y variaciones del tamaño del grano de las primeras partículas. Pyle, (1989) con un modelo simple de decaimiento exponencial cuantificó el volumen mínimo de caída con base en el área muestreada y cartografiada. Es un método lineal que muestra la disminución exponencial tanto de espesor como de tamaño del grano. Este método calcula el volumen mínimo porque muchas veces los depósitos finos distales se pierden por erosión, inclusive (Wen y Rose, (1994), consideró que el volumen calculado por decaimiento exponencial corresponde al valor mínimo expulsado porque muchos espesores distales no pueden ser mapeados. Posteriormente, Fierstein y Nathenson, (1992), propusieron el método del trapecoide. Este método establece una relación en función del logaritmo natural del espesor de una isopaca y la raíz cuadrada del área de la misma isopaca, para obtener el volumen se calcula el área bajo la curva adaptada a la forma de un trapecoide. Martin Del Pozzo et al., (2008) aplicaron los métodos del trapecoide y de Simpson para calcular depósitos con espesores menores a 1 mm del Volcán Popocatépetl (1994-1997). Estos autores concluyeron que el método de Simpson tuvo mayor precisión en el cálculo del volumen de erupciones con poca inyección de material piroclásticos, porque la falta de datos precisos para trazar las isopacas es limitada debido a que el material piroclásticos es erosionado

rápidamente y se puede representar un valor mínimo por la dificultad que hay para estimar el volumen de tefra. Bonadonna et al., (1998) propusieron la extrapolación más allá de la zona cartografiada de los depósitos y consideran que el método exponencial no es aplicable a erupciones con baja emisión de tefra. Bonadonna y Houghton, (2005) con el método ajuste de ley de potencia calcularon el volumen de tefra en áreas donde se encuentren rupturas en la pendiente del semilog del segmento de espesor vs la raíz cuadrada del área. Este método ha sido aplicado en erupciones principalmente vulcanianas con poco contenido de material de caída.

3.4. Modelos numéricos aplicados a depósitos de tefra

Los estudios recientes sobre la modelación de las columnas eruptivas se pueden clasificar en Modelos unidimensionales, bidimensionales y tridimensionales. Los modelos analíticos unidimensionales están basados en la teoría de la pluma convectiva y han sido una herramienta útil para la reconstrucción de erupciones plinianas (Wilson, 1980; Sparks et al., 1997). Estos modelos se basan en la descarga del magma y densidad atmosférica para estudiar gradientes internos de velocidad de la columna, estructura, densidad, temperatura, forma de la columna, y dispersión de la columna sin tomar en cuenta las variaciones atmosféricas y velocidad del viento horizontal.

Los modelos bidimensionales están basados en la solución semianalítica de ecuaciones que asumen una difusión atmosférica isotrópica y vertical con una velocidad de viento y sedimentación. Estos modelos están basados en parámetros empíricos como el coeficiente de difusión para describir la forma de la columna, resultado de la calibración y validación de los datos de campo de erupciones específicas. La ventaja de estos modelos es la simplicidad de la parametrización física, solución inversa de erupciones pasadas para estimar parámetros eruptivos como masa expulsada y altura de la columna (Scollo et al., 2008). HAZMAP, es un modelo semianalítico bidimensional basado en la ecuación de difusión, transporte y sedimentación de las partículas de tefra (Macedonio et al., 1988). Con el modelo HAZMAP se reconstruyó la erupción de 1980 de Santa Helena y la erupción del 79. A.D. del Vesubio (Armienti et al., 1988, Macedonio et al., 1988). Pfeiffer et al., (2005) remodelaron la erupción de 79 A.D. del Vesubio con HAZMAP3D. El modelo parte del

mismo principio teórico y considera la componente vertical de difusión atmosférica. Macedonio et al., (1988) al aplicar HAZMAP, utilizaron una sola parametrización para todas las clases de velocidad de sedimentación y representaron la variación temporal de la altura de la columna, además utilizaron un perfil de viento (verano) escalado y basado en datos estadísticos del sur de Italia. Pfeiffer et al., (2005) con HAZMAP3D, adaptaron un modelo general de velocidad de sedimentación de ceniza basado en datos experimentales de Walker et al., (1973) y de Wilson y Huang (1979). También consideraron la misma altura de la columna para cada fase eruptiva, así como la masa total, además utilizaron perfiles verticales de viento escalados a partir de 3 modelos de viento. HAZMAP también ha sido aplicado en las erupciones de 1995-1999 del Volcán Soufriere Hills (Bonadonna et al., 2002); del Etna en 2001 y 2006 (Scollo et al., 2008; Andronico et al., 2009), así como en campi Flegrei (Costa et al., 2009). Este modelo muestra que las columnas actúan como una línea vertical a partir de la fuente y que el movimiento de dispersión y asentamiento de las partículas es gobernado por la dirección, velocidad del viento y la sedimentación gravitacional horizontal (Macedonio et al., 1988; Macedonio et al., 2005). El modelo está limitado para zonas distales donde la dinámica de la columna muestra menor control. Por otro lado, Folch y Felpeto, (2005) acoplaron un modelo simple de dispersión de tefra ASHFALL, derivado del modelo de Armienti et al., (1988) y Macedonio, (1988). ASHFALL se fundamenta en la ecuación de transporte de difusión por advección, simplifica la expansión vertical por el coeficiente de dispersión horizontal y considera que la mayor concentración de partículas se da en la parte superior, la altura inicial con la velocidad de caída tiene el mismo valor. ASHFALL fue aplicado para erupciones subplinianas de la Montaña Blanca de Tenerife, en erupciones de 1995-1996 del Volcán Ruapehu y erupciones históricas del campo volcánico de Auckland, Nueva Zelanda (Hurts y Turner, 1999; Magill et al., 2006).

Durante los últimos años se han desarrollado modelos computacionales complejos como FALL3D que realiza predicciones numéricas para el transporte y sedimentación de cenizas volcánicas y es utilizado para evaluar la evolución temporal de las columnas eruptivas y predecir la concentración de ceniza en la atmósfera y en superficie (Costa et al., 2006; Barsotti et al., 2008; Macedonio et al., 2008, Costa et al., 2009, Folch et al., 2010, Selva et

al., 2010). El modelo FALL3D, es un modelo euleriano que resuelve ecuaciones de advección-sedimentación con difusión turbulenta, para cada clase de partícula sobre el terreno. Este modelo ha sido acoplado con componentes de velocidad de viento que se procesan con CALMET, modelo de diagnóstico meteorológico en 3D, basado en asimilación, interpolación o reanálisis de modelos de pronóstico meteorológico a mesoescala (Costa et al., 2006; Folch et al., 2010). FALL3D actualmente es utilizado en el Instituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia de Catania (Italia) y Volcanic Ash Advisory Center en Washington (VAAC), organismos internacionales para el monitoreo y predicción de nubes volcánicas. También ha sido aplicado para realizar mapas de probabilidad (Costa et al., 2006, Folch et al., 2011). Este modelo de seguimiento de partículas es utilizado para describir el transporte atmosférico de las cenizas volcánicas y requiere de un programa numérico para identificar el seguimiento continuo de las nubes volcánicas pero no ha sido utilizado para calcular la trayectoria de grandes depósitos.

3.5. Referencias

- Ahrens, C. Donald. (2005). *Essentials of Meteorology: on invitation to the atmosphere*. 4a. ed. Thomson. United States of America. 472 pp
- Andronico, D., Scollo S., Cristaldi A., Ferrari F. (2009). Monitoring ash emission episodes at Mt. Etna: The 16 November 2006 case study. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 180:123-134
- Armienti, P., Macedonio G., Pareschi M.T. (1988). A numerical-model for simulation of tephra transport and deposition - applications to May 18, 1980, Mount-St-Helens eruption, *Journal of Geophysical Research*. 93:6: 6463-6476
- Ayllón, T. (2003). *elementos de Meteorología y Climatología*. Ed. Trillas. México. 210 pp
- Barberi, F., Coltelli M., Frullani A., Rosi M., Almeida E. (1995). Chronology and dispersal characteristics of recently (last 5000 years) erupted tephra of Cotopaxi (Ecuador): implications for long-term eruptive forecasting, *Journal of volcanology and geothermal research*. 69: 217-239
- Barsotti, S., y Neri, A. (2008). The VOL - CALPUFF model for atmospheric ash dispersal: 2. Application to the weak Mount Etna plume of July 2001, *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*. 113, B03209, doi:10.1029/2006JB004624
- Bonadonna, C., Ernst G.G.J., Sparks, R.S.J. (1998). Thickness variations and volume estimates of tephra fall deposits: the importance of particle Reynolds number. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 81:173-187

- Bonadonna, C., Mayberry, G.C., Calder, E.S., Sparks, R.S.J., Choux, C., Jackson, P., Lejeune, A.M., Loughun, S.C., Norton, G.E., Rose, W.I., Ryan, G., y Young, S.R. (2002). Tephra fallout in the eruption of Soufriere Hills Volcano, Montserrat. Geological Society of London. Memoirs 21: 483-516
- Bonadonna, C., Houghton, B.F. (2005). Total grain-size distribution and volume of tephra fall deposits. *Bulletin of Volcanology* . 67:441–456
- Bursik, M. (1998). Tephra dispersal: Physics of explosive volcanic eruptions. Editado por: Gilbert J.S., and Sparks R.S.J. Geological Society London. 115-144
- Cas, R., y Wright J.V. (1987). *Volcanic Successions*. Allen & Unwin Publish London. 528 pp
- Capaccioni, B., y Cuccoli, F. 2005. Spatter and welded air fall deposits generated by fire-fountaining eruptions: cooling of pyroclastic during transport and deposition. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 145:3:4. 263-280
- Carey, S., y Sigurdsson, H. 1986. The 1982 eruptions of El Chichon Volcano, Mexico (2): Observations and numerical modeling of tephra-fall distribution. *Bulletin of Volcanology*. 48:127-141
- Carey, S., y Sparks, R.S.J. (1986). Quantitative models of the fallout and dispersal of tephra from volcanic eruptions. *Bulletin of Volcanology Geothermal of Research*. 48: 109-125
- Carey, S., y Sigurdsson, H. (1989). The intensity of plinian eruptions. *Bulletin of Volcanology*. 51:28-40
- Carey, S., Sigurdsson, H., Gardner, J.E., Criswell, W. (1990). Variations in column height and magma discharge during the May 18, 1980 eruption of Mount St. Helens. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 43:99-112
- Carey, R. J., Houghton, B. F., Thordarson, T., (2010). Tephra dispersal and eruption dynamics of wet and dry phases of the 1875 eruption of Askja Volcano, Iceland. *Bulletin of Volcanology*. 72:259–278. DOI 10.1007/s00445-009-0317-3
- Corradini, S., Merucci, L., Prata, A. J., Norway, K., Piscini, A. (2010). Volcanic ash and SO₂ in the 2008 Kasatochi eruption: Retrievals comparison from different IR satellite sensors. *Journal of Geophysical Research*. 115:D00L21. doi:10.1029/2009JD013634
- Costa, A., Macedonio, G., Folch, A. (2006). A three-dimensional Eulerian model for transport and deposition of volcanic ashes. *Earth Planet. Sci. Lett*. 241:634–647
- Costa, A., Dell'Erba, F., Di Vitoi, M., Isaii, R.G.M., Orsi, G., Pfeiffer, T. (2009). Tephra fallout hazard assessment at the Campi Flegrei caldera (Italy). *Bulletin of Volcanology*. 71:259–273. doi 10.1007/s00445-008-0220-3
- Fierstein, J., y Nathenson, M. (1992). Another look at the calculation of fallout tephra

- volumes. *Bulletin of Volcanology*. 54:156–167.
- Folch, A., y Felpeto, A. (2005). A coupled model for dispersal of tephra during sustained explosive eruptions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 145:3-4:337-349
- Folch, A., Costa, A., Macedonio, G. (2010). FALL3D: A computational model for transport and deposition of volcanic ash. *Computers and Geosciences*. 35:6. 1334-1342
- Folch, A., Costa, A., and Basart, S. (2011). Validation of the Fall 3D ash dispersion model using observations of the 2010 Eyjafjallajökull volcanic ash clouds. *Atmospheric environment*. doi:10.1016/j.atmosenv.2011.06.072
- Francis, P., y Oppenheimer C. (2004). *Volcanoes*. 2a edición. Oxford. 521 pp
- Gu, Y., Rose, W., Schneider, D., Bluth, G. J., Watson, M. (2005). Advantageous GOES IR results for ash mapping at high latitudes: Cleveland eruptions 2001. *Geophysical Research Letters*. 32:L02305. doi:10.1029/2004GL021651
- Huff, W.D., Kolata, D.R., Bergström, S.M., Zhang, Y-S. (1992). Large magnitude Middle Ordovician volcanic ash falls in North America and Europe: dimensions, emplacement and post-emplacement characteristics. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 73:285-301
- Hurst, A. W., y Turner, R. (1999). Performance of the program ASHFALL for forecasting ashfall during the 1995 and 1996 eruptions of Ruapehu volcano, New Zealand. *Journal of Geology and Geophysics*, 42:4:615-622
- Ishimine, Y. (2006). Sensitivity of the dynamics of volcanic eruption columns to their shape. *Bulletin of Volcanology*. 68:516-537.
- Macedonio, G., Pareschi, M., Santacroce, R. (1988). A numerical simulation of the Plinian fall phase of the 79 AD eruption of Vesuvius. *Journal of Geophysics Research*. 93:12:14817–14827.88
- Macedonio, G., Costa, A., Longo, V. (2005). A computer model for volcanic ash fallout and assessment of subsequent hazard. *Computer & Geoscience* 31. 837–845
- Macedonio, G., y 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
- Magill, C., Hurst, A., Hunter, L., Blong, R. (2006). Probabilistic tephra fall simulation for the Auckland region, New Zealand. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 153:370-386
- Martin Del Pozzo, A. L., González, M. T., Espinasa, P. R. (2008). Characterization of the recent ash emissions at Popocatepetl Volcano, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 170:1-2:61-75
- Mayberry, G.C., Rose, W.I., Bluth, J.S. (2002). Dynamics of volcanic and meteorological clouds

produced on 26 December (Boxing day) 1997 at Soufrière Hills Volcano, Montserrat. Geological Society of London. *Memoirs* 21: 539-555

-Pyle, D. M. (1989). The thickness, volume and grainsize of tephra fall deposits, *Bulletin of Volcanology*. 51:1:1-15

-Pfeiffer, T., Costa, A., Macedonio, G. (2005). A model for the numerical simulation of tephra fall deposits. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 140:273:294

-Rose, W. I., Delene, D.J., Schneider, D.J., Bluth, G.J.S., Krueger, A. J., Sprod, I., Mckee, C., Davies, H.L., Ernst, G.G (1995). Ice in the 1994 Rabaul eruption cloud: implications for volcano hazard and atmospheric effects. *Nature*. 375:477-479

-Rosi, M. (1998). Plinian Eruption Columns: Particle transport and fallout. In *From Magma to Tephra: Modelling Physical Processes of Explosive Volcanic Eruptions*. Edit. Freundt Armin y Rosi Mauro. 139-169

-Scollo, S., and Folch, A. Costa, A. (2008). A parametric and comparative study of different tephra fallout models, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 176:2:199-211

- Selva, J., Costa, A., Marzocchi, W., Sandri, L. (2010). BET_VH: exploring the influence of natural uncertainties on long-term hazard from tephra fallout at Campi Flegrei (Italy). *Bulletin of Volcanology* 72:717–733. DOI 10.1007/s00445-010-0358-7

-Sparks, R.S.J. (1986). The dimensions and dynamics of volcanic eruption columns. *Bulletin of Volcanology*. 48:3-15

Sparks, R. S., Bursik, M.I., Carey, S.N., Gilbert, J.S., Glaze, L.S., Sigurdsson, H., Woods, A. (1997). *Volcanic Plumes*. John Wiley & Sons. England. 573 pp

-Schneider, D., Rose, I W., Coke, L R., Bluth, J.S. (1999). Early evolution of a stratospheric volcanic eruption cloud as observed with TOMS and AVHRR. *Journal of geophysical research*. 104-D4. 4037-4050

Walker, G.P.L. (1980). The Taupo pumice: product of the most powerful known (ultraplinian) eruption?. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 8:69-94

-Walker, G.P.L. (1981). Plinian eruptions and their products. *Bulletin of Volcanology*. 44 (2):223-240

-Wen, S., y Rose, W. (1994). Retrieval o sizes and total masses of particles in volcanic clouds using AVHRR bands 4 y 5. *Journal Geophysics Research*. 99:5421-5431

-Wilson, L. (1980). Relationships between pressure, volatile content and ejecta velocity in three types of volcanic explosions. *Journal Geothermal Research*. 8:297-313

-Wiesner Martin, G., y Wang Yubo. (1996). Dispersal of the 1991 Pinatubo tephra in the south

China sea. Fire and Mud Eruptions and Lahars of Mount Pinatubo, Phillipines. Compiladores: Newall, C., y Punongbayan, R.S. Honk Kong. 1063-1070:537-543

-Withman, C.S., Oppenheimer, C., Horwell, C.J. (2005). Volcanic ash-leathates: a review and recommendations for sampling methods. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 141:299-326

-Woods, A.W. (1994). The dynamics and thermodynamics of volcanic clouds: theory and observations from the April 21, 1990 eruptions of Redoubt Volcano, Alaska. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 62:273-299

-Woods, A.W., Holasek R.E., Self S. (1995). Wind-driven dispersal of volcanic ash plumes and its control on the thermal structure of the plume-top. *Bulletin of Volcanology*. 57:283-292

CAPÍTULO 4. MODELO DEL CAMPO DE VIENTO

Uno de los objetivos de esta investigación es identificar el comportamiento del campo de viento horizontal. Esto se llevó a cabo a partir de radiosondeos globales de 15 años (1980-1995) de la base Global Gridded Upper Air Statistics (GGUAS) del European Centre for Medium Range Weather Forecast (ECMWF). La calidad de los datos de la base GGUAS estuvo sujeta al registro de radiosondeos originales. Se escogió esta base de datos porque se basa en datos de radiosondeo validados a partir del análisis estadístico global realizado por el ECMWF. El análisis horizontal se complementó con el procesamiento de los radiosondeos locales (Manzanillo y Guadalajara 1980-2005) sobre diferentes niveles de altitud, para identificar las zonas de mayor probabilidad de afectación por caída de ceniza para cada mes.

El modelo cinemático del campo de viento regional (México) desarrollado en este trabajo, forma parte de un modelo de diagnóstico global de los patrones del tiempo. El modelo cinemático permite obtener a partir del viento observado o el viento real los campos de vorticidad y de convergencia-divergencia. Estos movimientos atmosféricos ayudan a identificar las circulaciones ciclónicas y anticiclónicas asociadas al movimiento convergente y divergente de diferentes niveles de la atmósfera. Las zonas de convergencia en niveles bajos producen una corriente de aire ascendente y están asociadas a zonas de baja presión en la atmósfera baja (Figura 13A). Las zonas de divergencia en niveles bajos se producen por la subsidencia de aire por zonas de alta presión en niveles superiores (Figura 13B). Las zonas de rotación se generan por el cizallamiento del aire debido a la diferencia de velocidades del viento (Figura 13C).



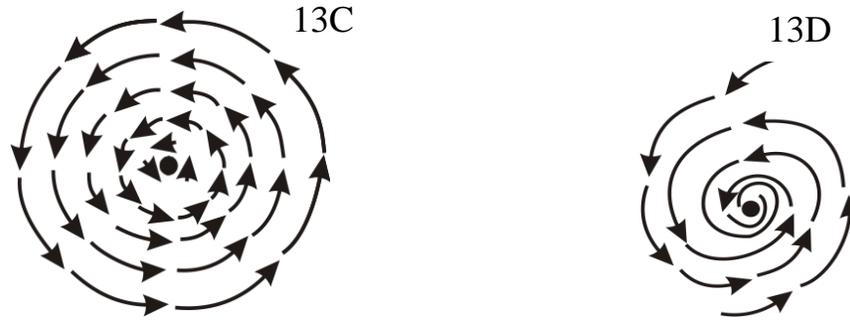


Figura 13. Líneas de corriente del movimiento convergente (A). Líneas de corriente del movimiento divergente (B). Movimiento rotacional ciclónico (C). Movimiento convergente con circulación ciclónica (D). (Modificada de Dutton, 1986).

4.1. Base de datos Global Gridded Upper Air Statistic (GGUAS)

La base GGUAS tiene un cubrimiento global, una resolución espacial de 2.5×2.5 grados (73×144 puntos) formada por 10,512 celdas y una resolución temporal mensual de 2 registros diarios 0000Z y 1200Z para 15 niveles estándar (Tabla 1). Cada nivel atmosférico contiene la media mensual de las componentes hacia el este del viento (u), hacia el norte (v); y la intensidad del viento (m/s); temperatura del aire ($^{\circ}\text{C}$); punto de rocío ($^{\circ}\text{C}$) y densidad (kg/m).

Tabla 1. Niveles atmosféricos estándar de la base Global Gridded Upper Air Statistic (1980-1995).

Nivel atmosférico	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Presión (mb)	superficie	1000	850	700	500	400	300	250	200	150	100	70	50	30	10
Altitud (msnm)	1000	150	1500	3000	5000	7000	9000	10000	12000	14000	16000	18000	20000	23000	31000

4.2. Base teórica del modelo cinemático del campo de viento horizontal

El modelo de diagnóstico local del viento se basa en un sistema de coordenadas local (x, y, z) sobre un punto de la superficie terrestre, (x) hacia el este, (y) hacia el norte y (z) en la dirección vertical respectivamente. Sea $\mathbf{x}_0 = (x_0, y_0)$ un punto cercano al Volcán de Colima con componentes de viento $\mathbf{u}(\mathbf{x}_0) = (u(x_0), v(x_0)) = (u_0, v_0)$, entonces las componentes del viento horizontal en una vecindad $\mathbf{x}_0 + \mathbf{r}$ del punto \mathbf{x}_0 se pueden aproximar como:

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}_0 + \mathbf{r}) = \mathbf{u}(\mathbf{x}_0) + (\mathbf{x} - \mathbf{x}_0) \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \mathbf{x}} \right)_{\mathbf{x}_0} + (\mathbf{y} - \mathbf{y}_0) \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \mathbf{y}} \right)_{\mathbf{x}_0} + \dots \quad (1)$$

Dónde $\mathbf{r} = \mathbf{x} - \mathbf{x}_0$, $\mathbf{x} = (x, y)$, y puede ser que $\mathbf{x}_0 = (0, 0)$. Las ecuaciones anteriores simplificadas pueden expresarse en forma matricial como:

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} u(x) \\ v(y) \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} u_0 \\ v_0 \end{pmatrix} + \frac{1}{2} \begin{pmatrix} \delta & 0 \\ 0 & \delta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 0 & -\zeta \\ \zeta & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \frac{1}{2} \begin{pmatrix} T & 0 \\ 0 & -T \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 0 & H \\ H & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \\ &= \mathbf{u}_0 + \mathbf{u}_\delta + \mathbf{u}_\zeta + \mathbf{u}_T + \mathbf{u}_H \end{aligned} \quad (2)$$

Dónde $\delta = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}$, indica la convergencia-divergencia horizontal del viento; $\zeta = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$, es la componente vertical de la vorticidad; $H = \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x}$, la deformación cortante y $T = \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y}$, la deformación por estiramiento.

La ecuación (2) da la variación lineal en el campo de velocidades cerca del punto \mathbf{x}_0 (Dutton, 1986). El tipo de movimiento más simple es el de translación que se obtiene al considerar solo el primer término en la ecuación (2): $\mathbf{u}(\mathbf{x}_0) = u_0(\mathbf{x}_0) \mathbf{i} + v_0(\mathbf{x}_0) \mathbf{j}$, dónde \mathbf{i}, \mathbf{j} son vectores unitarios a lo largo de los ejes x, y .

Sea un campo de movimiento donde exista sólo la divergencia horizontal δ ($\zeta = T = H = 0$), en este caso la ecuación (2) se expresa como:

$$\begin{pmatrix} \frac{dx}{dt} \\ \frac{dy}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\delta}{2} & 0 \\ 0 & \frac{\delta}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (3)$$

La matriz anterior 2×2 es diagonal y tiene valores propios $\lambda_1 = \frac{\delta}{2}$ y $\lambda_2 = \frac{\delta}{2}$. La solución para las líneas de corriente $\frac{dy}{dx} = \frac{v}{u} = \frac{y}{x}$, son líneas de corriente $\begin{pmatrix} x(t) \\ y(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_1 e^{\lambda_1 t} \\ c_2 e^{\lambda_2 t} \end{pmatrix}$

convergentes al origen si $\delta < 0$ (Figura 13A) y divergentes si $\delta > 0$ (Figura 13B) donde (C_1, C_2) son constantes que dependen de la posición inicial de la partícula.

Sea ahora un campo de movimiento donde existe solo el campo de vorticidad ζ ($\delta = T = H = 0$) en la ecuación (2):

$$\begin{pmatrix} \frac{dx}{dt} \\ \frac{dy}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -\frac{\zeta}{2} \\ \frac{\zeta}{2} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (4)$$

Al integrar el sistema anterior da una familia de líneas de corriente concéntricas al origen. El carácter de este tipo de movimiento puede ser identificado al usar coordenadas polares (r, θ) , con θ aumentando en sentido contrario a las manecillas del reloj desde el eje de las x y r en la dirección radial desde el origen del sistema local de coordenadas, entonces $x = r \cos \theta$, $y = r \text{ sen } \theta$ y $r = \sqrt{x^2 + y^2}$, donde se genera un conjunto ortogonal $(\mathbf{e}_r, \mathbf{e}_\theta)$ de vectores unitarios, \mathbf{e}_r en la dirección radial y \mathbf{e}_θ en la dirección tangencial donde se incrementa θ . Entonces la proyección del viento \mathbf{u} en la dirección radial $\hat{\mathbf{e}}_r$ es u_r y u_θ la proyección del viento \mathbf{u} en la dirección tangencial \mathbf{e}_θ .

Al resolver la ecuación (4) en coordenadas polares se obtiene que $r(t) = r(0)$ y $\theta(t) = \theta(0) + \frac{\zeta}{2} t$, entonces las soluciones en el plano nos permite obtener que:

$$\begin{pmatrix} x(t) \\ y(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r(0) \cos[\theta(0) + \frac{\zeta}{2} t] \\ r(0) \text{ sen}[\theta(0) + \frac{\zeta}{2} t] \end{pmatrix} \quad (5)$$

el cual demuestra que si $\zeta > 0$ entonces tenemos circulación ciclónica (Figura 13C), y si $\zeta < 0$ entonces se tiene una circulación anticiclónica.

Suponiendo ahora que alrededor del Volcán de Colima se tienen zonas de convergencia o divergencia y además de vorticidad ($T = H = 0$), en la ecuación 2, entonces resulta:

$$\begin{pmatrix} \frac{dx}{dt} \\ \frac{dy}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\delta}{2} & -\frac{\zeta}{2} \\ \frac{\zeta}{2} & \frac{\delta}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (6)$$

La solución general para este caso de acuerdo a Hirsch y Smale, (1974) es la siguiente (7):

$$\begin{pmatrix} x(t) \\ y(t) \end{pmatrix} = e^{(t-t_0) \frac{\delta}{2}} \begin{pmatrix} x_0 \cos(t-t_0)\frac{\zeta}{2} - y_0 \operatorname{sen}(t-t_0)\frac{\zeta}{2} \\ y_0 \cos(t-t_0)\frac{\zeta}{2} - x_0 \operatorname{sen}(t-t_0)\frac{\zeta}{2} \end{pmatrix} \quad (7)$$

Donde las constantes x_0 , y_0 y t_0 están relacionadas con la posición inicial de las cenizas o parcelas de aire. Esto demuestra que si hay campos de convergencia $\delta < 0$ y circulaciones ciclónicas $\zeta > 0$, entonces la configuración del patrón de líneas de corriente es una espiral ciclónica convergente al origen (Figura 13D); con circulaciones anticiclónicas $\zeta < 0$, entonces se obtiene una espiral anticiclónica convergente al origen.

Por otro lado, si en la troposfera superior sobre la zona del Volcán de Colima tenemos campos de divergencia $\delta > 0$ que es común en verano y circulación anticiclónica $\zeta < 0$, entonces obtenemos una circulación anticiclónica divergente que frecuentemente se observa en la circulación monzónica de México o en la circulación anticiclónica divergente de los ciclones tropicales.

Cuando se presentan todos los movimientos en la ecuación (2) el estudio analítico local es más complejo, por lo que en este caso nos enfocamos a un análisis global y regional. En este trabajo se considera el movimiento aproximado como:

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_\delta + \mathbf{u}_\zeta = \nabla\chi + \mathbf{k} \times \nabla\psi$$

Donde ∇ es el operador gradiente horizontal, \mathbf{k} es el vector unitario a lo largo del eje z, \mathbf{u}_δ es el viento divergente o irrotacional y \mathbf{u}_ζ es el viento rotacional o no divergente. Estos

vientos expresados en términos de la función potencial χ , y la función corriente ψ respectivamente son $\mathbf{u}_\delta = \mathbf{u}_\delta(\chi) = \mathbf{u}_\chi$ y $\mathbf{u}_\zeta = \mathbf{u}_\zeta(\psi) = \mathbf{u}_\psi$ (Pérez García, 1985).

La medida de divergencia o convergencia asociada a la función potencial es $\delta = \nabla \cdot \mathbf{u} = \nabla^2 \chi$ y la medida de vorticidad asociada a la función corriente es $\zeta = \mathbf{k} \cdot \nabla \times \mathbf{u} = \nabla^2 \psi$.

Por lo que si ζ y δ son dados, el método numérico global resuelve las ecuaciones de Poisson para ψ y χ :

$$\begin{aligned}\Delta\psi &= \zeta \\ \Delta\chi &= \delta\end{aligned}$$

Donde $\Delta = \nabla^2$ es el operador Laplace sobre la esfera utilizando una malla gaussiana en toda la esfera terrestre.

La dispersión de tefra depende fundamentalmente de la altura de la columna y de la dirección dominante del viento, por lo que la aplicación del modelo global atmosférico permitió identificar la circulación atmosférica regional para obtener la dirección del campo de vientos a partir de la base global (GGUAS).

4.3. Algoritmo numérico cinemático para seguir la trayectoria de ceniza volcánica

El algoritmo numérico cinemático aplicado en este trabajo puede aplicarse bajo los siguientes pasos:

1. Sean datos de viento ($\mathbf{u}_p, \mathbf{v}_p$) dados por un modelo de pronósticos del tiempo (por ejemplo GFS –Global Forecast System) o vientos de satélite ($\mathbf{u}_s, \mathbf{v}_s$) en una cierta hora del día. De estos datos de viento obtenemos (\mathbf{u}, \mathbf{v}) por medio de un análisis objetivo.
2. Se calculan los campos de vorticidad (ζ), campo de divergencia (δ), zonas de deformación cortante (H) y zonas de deformación por estiramiento (T).

3. Por lo que si ζ y δ son dados, entonces se encuentran la función de corriente (ψ) y la función potencial (χ) al resolver las ecuaciones de Poisson:

$$\begin{aligned}\Delta\psi &= \zeta \\ \Delta\chi &= \delta\end{aligned}$$

Siguiendo una malla global (método espectral) o malla regional (método de diferencia finita). Se utilizan estos campos para tener una visión gráfica de lo que ocurre en los alrededores del Volcán de Colima.

4. Los datos de vientos actualmente se pueden adquirir cada hora a partir de registros satelitales o pronósticos numéricos en los niveles obligatorios de la atmósfera. Por simplicidad se supone que inicialmente se tiene el campo de vorticidad y divergencia sobre el Volcán de Colima (ecuación 6), entonces el método numérico local integra el algoritmo Kuta- Runge en la ecuación 6. Por ejemplo, al usar intervalos de tiempo de cada 5 minutos se obtiene la posición futura de las partículas de ceniza (x_t, y_t).

5. Después se interpola ζ y δ dados inicialmente en la malla regular, o sea ζ y δ se mantienen estacionarios en cada punto de la malla.

6. Se repiten los pasos 4 y 5 hasta que llegue la siguiente hora de pronóstico de datos satelitales.

4.3 REFERENCIAS

-Dutton, J. A. (1986). The ceaseless wind: an introduction to the theory of atmospheric motion. New York. 615 pp

-Hirsch, M.W., y Smile S. (1974). Differential equations, dynamical system and linear algebra. Academic Press. p.358

-Pérez-García, I. (1985). Un análisis semiobjetivo para el campo de viento en los trópicos. Geofísica Internacional. 24:3:425-437

CAPÍTULO 5. RESULTADOS DEL CAMPO DE VIENTO HORIZONTAL

El análisis mensual del campo de viento horizontal fue resultado del procesamiento de la base de datos Global Gridded Upper Air Statistics (GGUAS) a partir del modelo de diagnóstico global y regional atmosférico. Los resultados del análisis del campo de viento se organizaron en cinco grupos altitudinales porque tuvieron direcciones y velocidades similares. La agrupación de los meses se dio a partir del mes en que inicia la circulación del viento dominante para cada uno de los grupos (Tabla 2). El grupo más bajo inició a 3000 msnm, 1000 m más abajo del nivel del cráter (4000 msnm), ya que el objetivo principal fue identificar la circulación del viento para los posibles escenarios de ceniza ante un evento pliniano con una columna de 23 km aproximadamente.

Tabla 2. Grupos para el campo de viento horizontal por nivel atmosférico estándar.

GRUPO	I	II	III	IV	V
Nivel atmosférico (mb)	700-500	400-300; 250-200	150-100	70-50	30-10
Altitud (msnm)	3000-6000	7000-9000; 10000-12000	14000-16000	18000-2000	23000-30000

Los resultados del campo de viento horizontal se presentan para cada grupo con sus mapas correspondientes al viento observado (viento real), campos de función corriente y campos de función potencial asociados a zonas de rotación y zonas de convergencia-divergencia respectivamente. El campo de viento ha sido trazado cada 2.5° latitud \times 2.5° de longitud a partir del modelo de diagnóstico atmosférico. El viento observado o viento real, está dado sobre superficies isobáricas con su respectiva altura geopotencial, dos parcelas de aire se pueden encontrar en la misma superficie isobárica y tener dos alturas geopotenciales diferentes, por tanto tener una energía potencial distinta. Los meses más representativos para cada uno de los grupos se muestran en la siguiente sección y todas las figuras por mes y nivel atmosférico se encuentran en el Apéndice 1.

5.1. Distribución del campo de viento

Grupo I (*troposfera media*). Se compone de los niveles de presión atmosférica estándar de 700 a 500 mb que cubren los 3 000 y 5 800 msnm. A partir de los 700 mb (3 000 msnm) se

presenta una circulación anticiclónica divergente sobre el centro de México en octubre que incluye al Volcán de Colima (Figura 14A). Los vientos del suroeste predominan de noviembre a mayo (Figura 14B y 14C), y vientos del este y sureste de junio a octubre (Figura 14D).

En el nivel de 500 mb (5 800 msnm) los vientos del oeste se presentan de noviembre a abril, En caso de ocurrir una pequeña erupción la columna de ceniza menor a 1.5 km de altura se puede dispersar al este del volcán (Figura 15A). La circulación anticiclónica es recurrente en mayo, junio y de septiembre a diciembre (Figura 15B, 15C y 15D). En caso de ocurrir una erupción en estos meses las partículas finas permanecerían más tiempo en la atmósfera y se dispersarían en diferentes direcciones. Los vientos del este y sureste se presentan en julio y agosto. La velocidad mínima del viento varía de 0.2 m/s en marzo, junio y septiembre mientras que la máxima es de 31 m/s en el mes de enero (Tabla 3).

Tabla 3. Velocidad media mensual del campo de viento horizontal en el Volcán de Colima de enero a diciembre de 700 a 10 mb.

Nivel (mb)	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	junio	Julio	Agosto	Sept	Oct	Nov	Dic
10	16.5	13.8	13.1	16.3	17.2	24.8	28.4	27.9	19.9	14.7	19.0	24.9
30	9.8	8.6	6.9	7.1	13.6	20.0	23.3	21.3	18.3	13.4	9.1	11.3
50	13.1	11.9	8.9	5.9	7.1	13.5	17.2	16.9	13.6	8.6	9.9	12.9
70	19.0	17.9	14.7	11.4	4.9	9.5	14.1	13.8	11.2	8.4	13.4	17.8
100	29.0	28.4	26.2	22.7	15.8	8.3	10.1	10.4	9.5	15.3	21.4	26.8
150	41.1	40.2	39.0	35.0	27.7	17.2	12.9	14.2	18.8	24.1	32.1	38.2
200	45.5	42.9	41.6	37.0	28.5	18.9	15.6	17.8	21.2	26.8	35.3	42.5
250	43.4	39.6	38.3	32.5	24.2	22.7	14.0	16.0	18.5	24.4	33.2	40.5
300	38.8	35.7	33.2	27.4	19.2	14.7	11.6	13.1	15.2	21.1	29.6	36.7
400	31.1	28.8	25.1	20.8	15.3	11.2	7.9	8.8	15.2	16.0	23.6	29.8
500	25.0	25.0	20.0	16.9	12.4	8.7	7.0	6.2	7.4	12.4	19.2	24.1
700	14.8	13.7	11.6	10.0	7.0	5.8	8.7	7.1	10.2	7.3	11.6	14.1

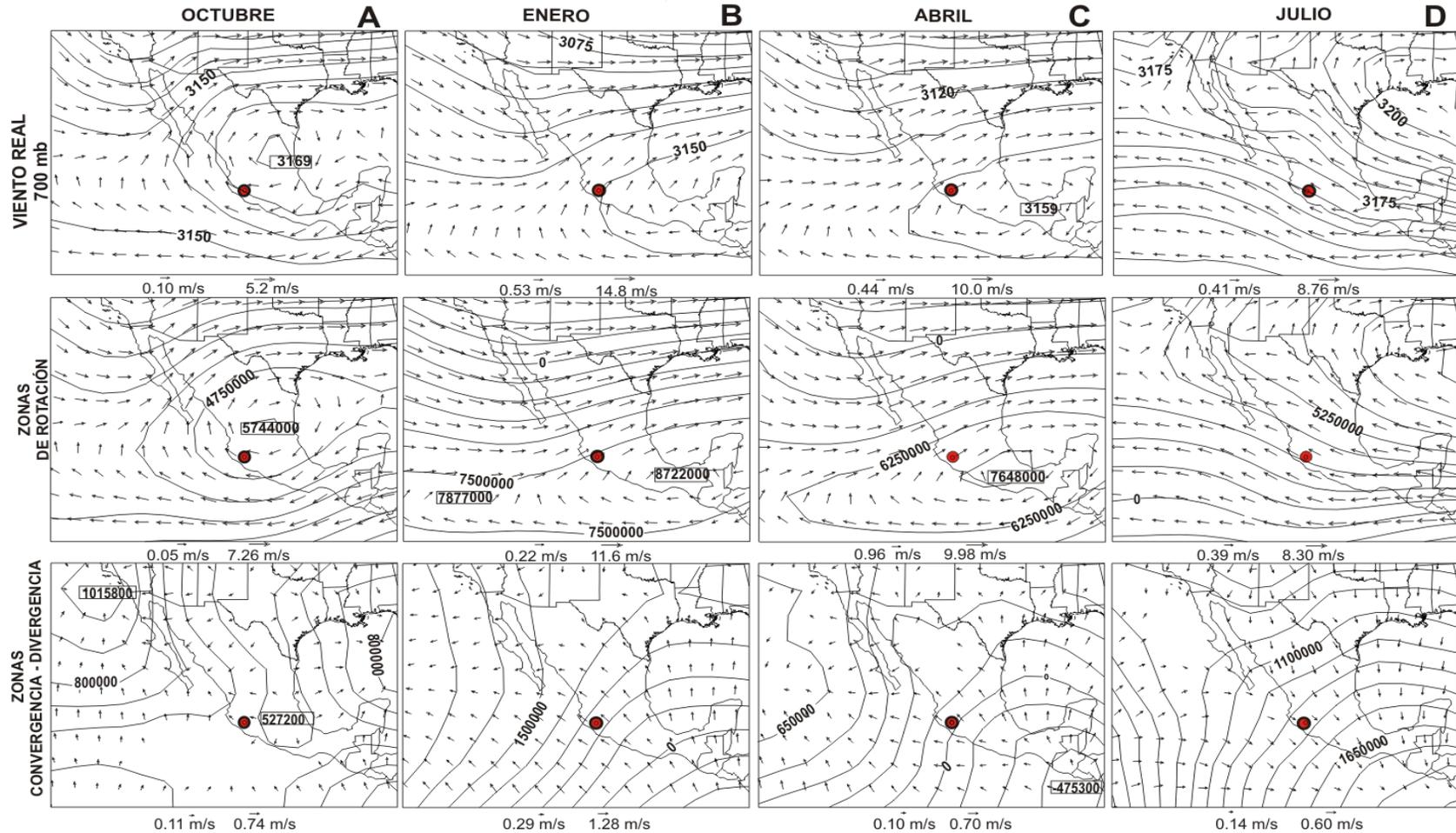


Figura 14. GRUPO 1. Campo del viento horizontal a 700 mb. Volcán de Colima (círculo). El viento observado o viento real corresponde a la primera fila de mapas. La segunda fila muestra el viento rotacional o viento no divergente u_{ψ} y los contornos son de la función corriente ψ , y la tercera línea corresponde al viento divergente v_x y los contornos corresponden a la función potencial. Figura 14A, 14B y 14C. En la zona del Volcán de Colima se presentan vientos dominantes del suroeste y una zona de rotación en enero y abril. 14D. En julio se presentan vientos del sureste sobre la misma área.

Impacto de la caída de ceniza del Volcán de Colima

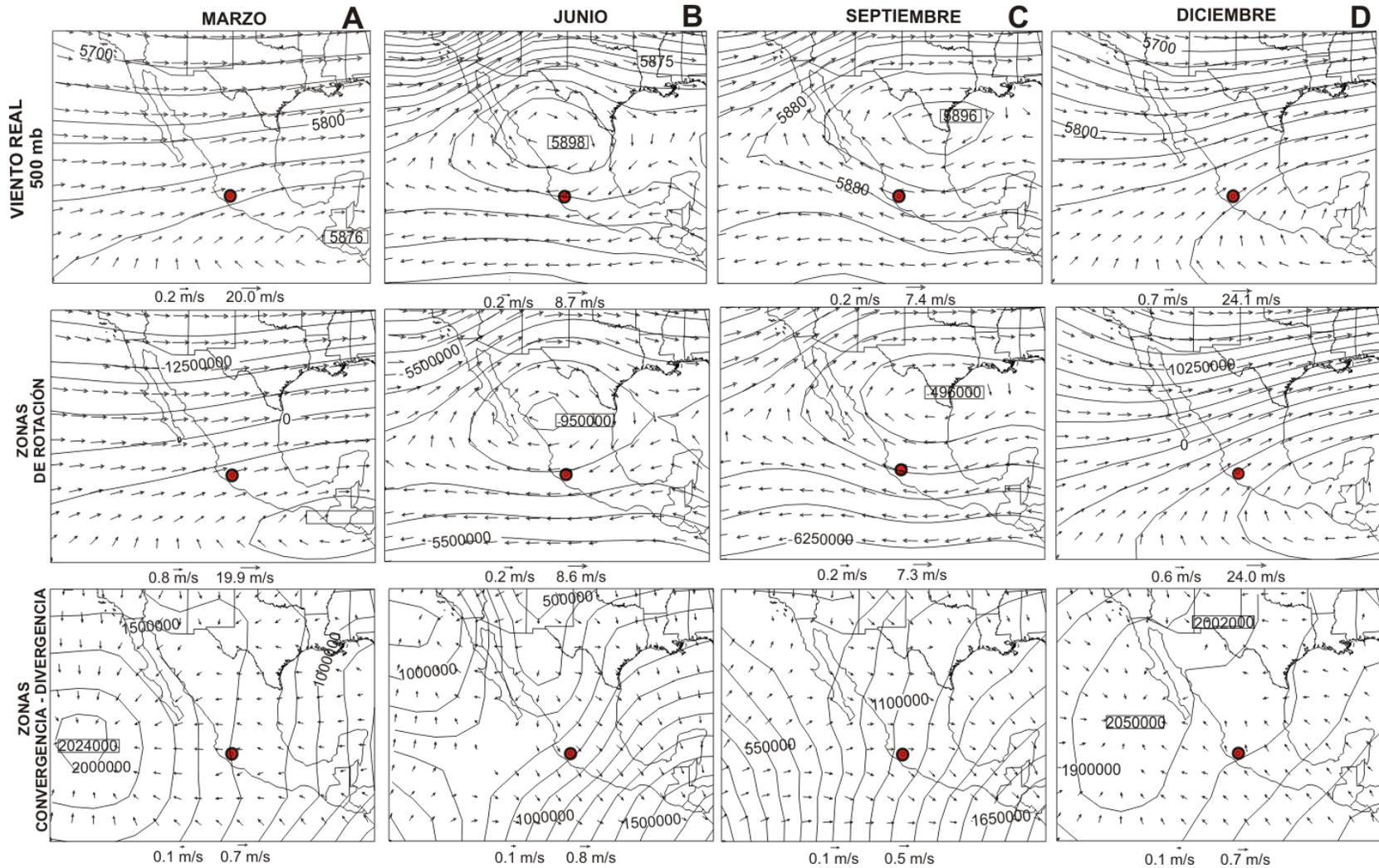


Figura 15. GRUPO 1. Circulación del viento a 500 mb. A. En marzo el viento dominante es del oeste. 15B. y 15C. En junio y septiembre se forma una circulación anticiclónica en el centro de México. 15D. Vientos del suroeste y una circulación anticiclónica se presenta en diciembre.

Grupo II (*troposfera superior*). Corresponde a los niveles atmosféricos de presión estándar que presentan características similares de dirección y velocidad. 400, 300, 250 y 200 mb, niveles establecidos desde la base de datos GGUAS y son equivalentes a 7 000, 9 000, 10 000 y 12 000 msnm. De 400 a 200 mb (7 000 a 12 000 msnm), se observan vientos dominantes del oeste y suroeste de octubre a mayo en el Volcán de Colima (Figura 16A, 16B, 16C y 16D), mientras que los vientos del noreste y este predominan de junio a septiembre y están asociados a la circulación anticiclónica monzónica de Norteamérica (Figura 16E y 16F). También se identifican vientos divergentes en julio para la zona del volcán. Si se presenta una columna de 4 a 8 km de altura, la dirección de la columna se inclinará hacia el sur-sureste y la trayectoria de las partículas finas puede permanecer más tiempo en la atmósfera y retornar otra vez sobre el volcán. De acuerdo a la discusión teórica local, las cenizas pueden tener una trayectoria espiral anticiclónica divergente. Esto ocasionaría un problema al tráfico aéreo. Las velocidades máximas de 32 a 48 m/s se presentan en enero-abril, mientras que las velocidades mínimas de 1 m/s se dan de junio a septiembre (Tabla 3).

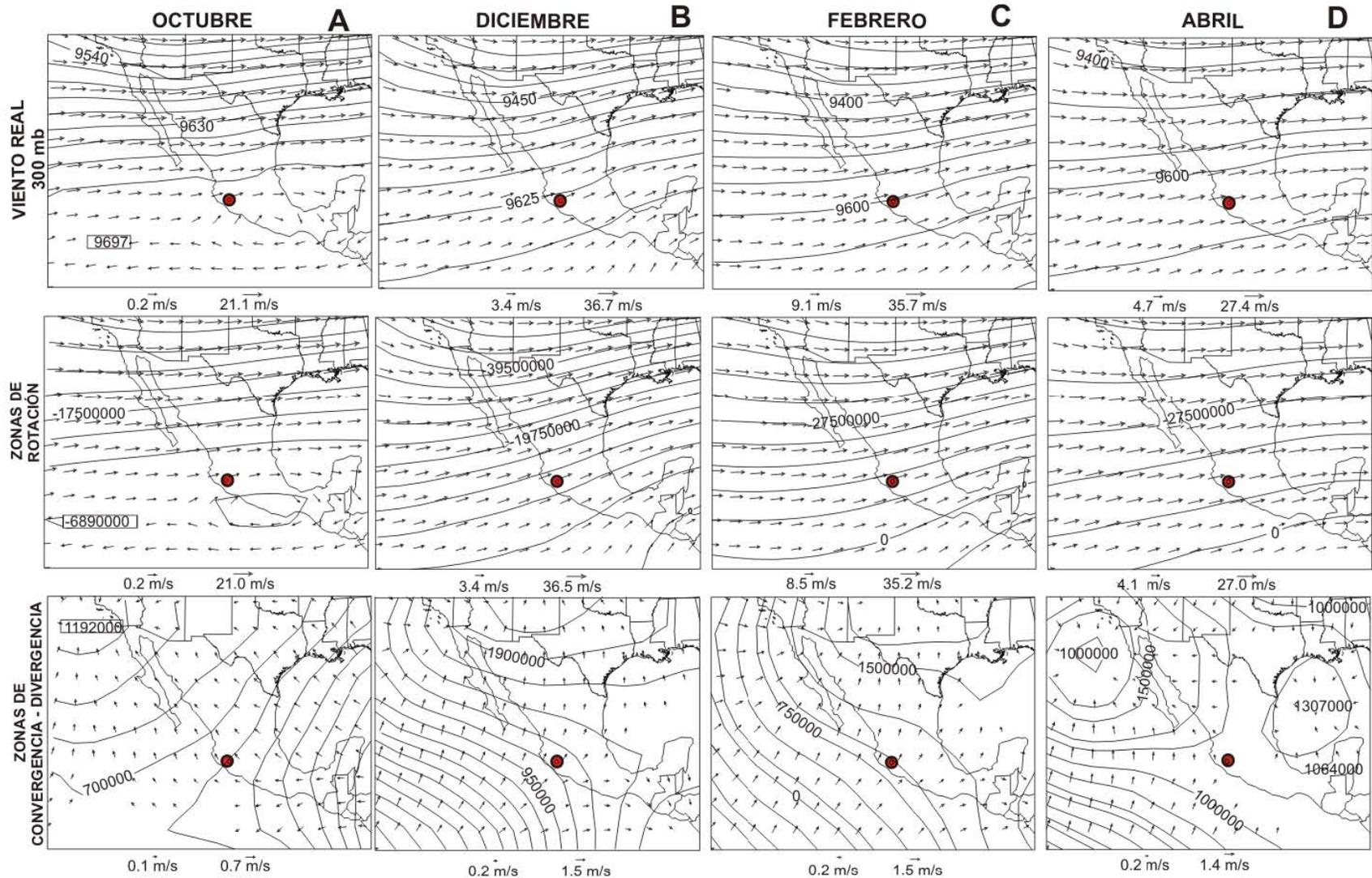


Figura 16. GRUPO II. Campo de viento a 300 mb. 16A. En octubre dominan los vientos del oeste. 16B y 16C. Se presentan vientos del suroeste en diciembre y febrero. D. Vientos del oeste en abril.

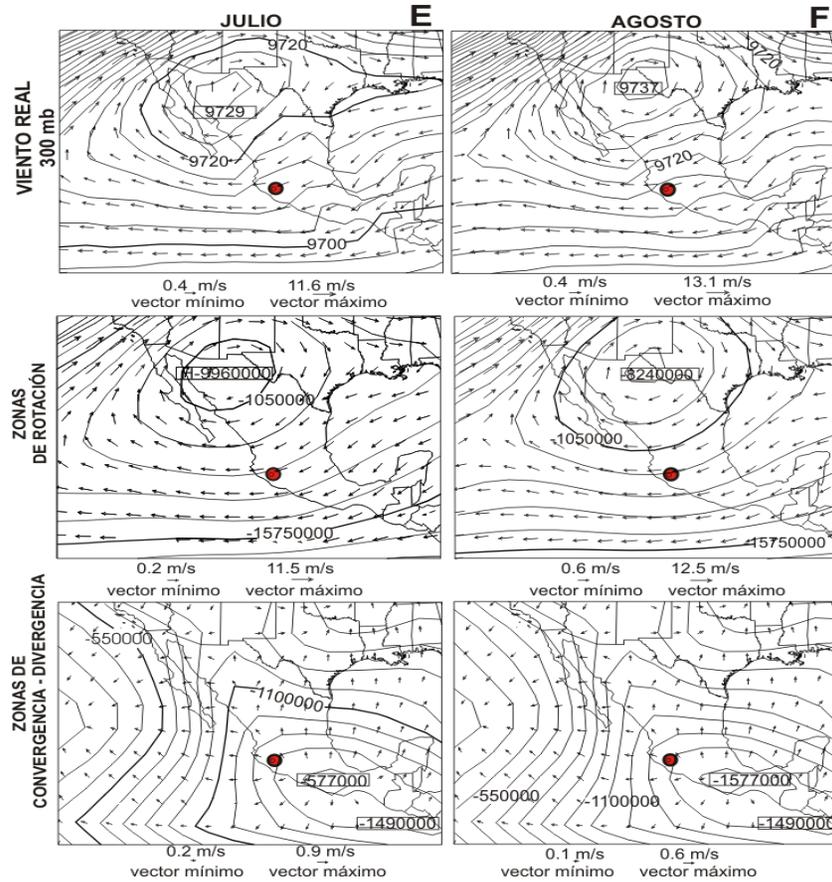


Figura 16E y 16F. GRUPO II. Campo de viento a 300 mb. En ambas figuras se observan vientos del noreste y del este asociados a la circulación anticiclónica divergente en julio y agosto.

Grupo III (*estratosfera baja*). Este grupo está formado por dos niveles de presión estándar: 150 mb a 100 mb asociado a altitudes de 14 000 a 16 000 msnm. A estas altitudes, en la zona del Volcán de Colima y se presenta una circulación anticiclónica en junio, septiembre y octubre (17A). Los vientos del este y noreste asociados al anticiclón monzónico predominan en julio y agosto (Figura 17B y 17C). También se presentan vientos divergentes de mayo a septiembre (Figura 17D) y los vientos del oeste circulan de octubre a mayo (Figuras 17E, 17F). Si llega a presentarse una erupción con una columna de 10 o 12 km de altura entre junio y septiembre las cenizas podrían permanecer mayor tiempo en la atmósfera debido la posible trayectoria anticiclónica divergente. Esto ocasionaría un problema al tráfico aéreo debido a que los aviones circulan entre 10 y 11 km de altitud. La velocidad máxima que presentan los vientos varían de 35 a 41 m/s de enero-abril y de noviembre-diciembre, mientras que la velocidad mínima que se presenta es menor a 1 m/s entre junio-septiembre.

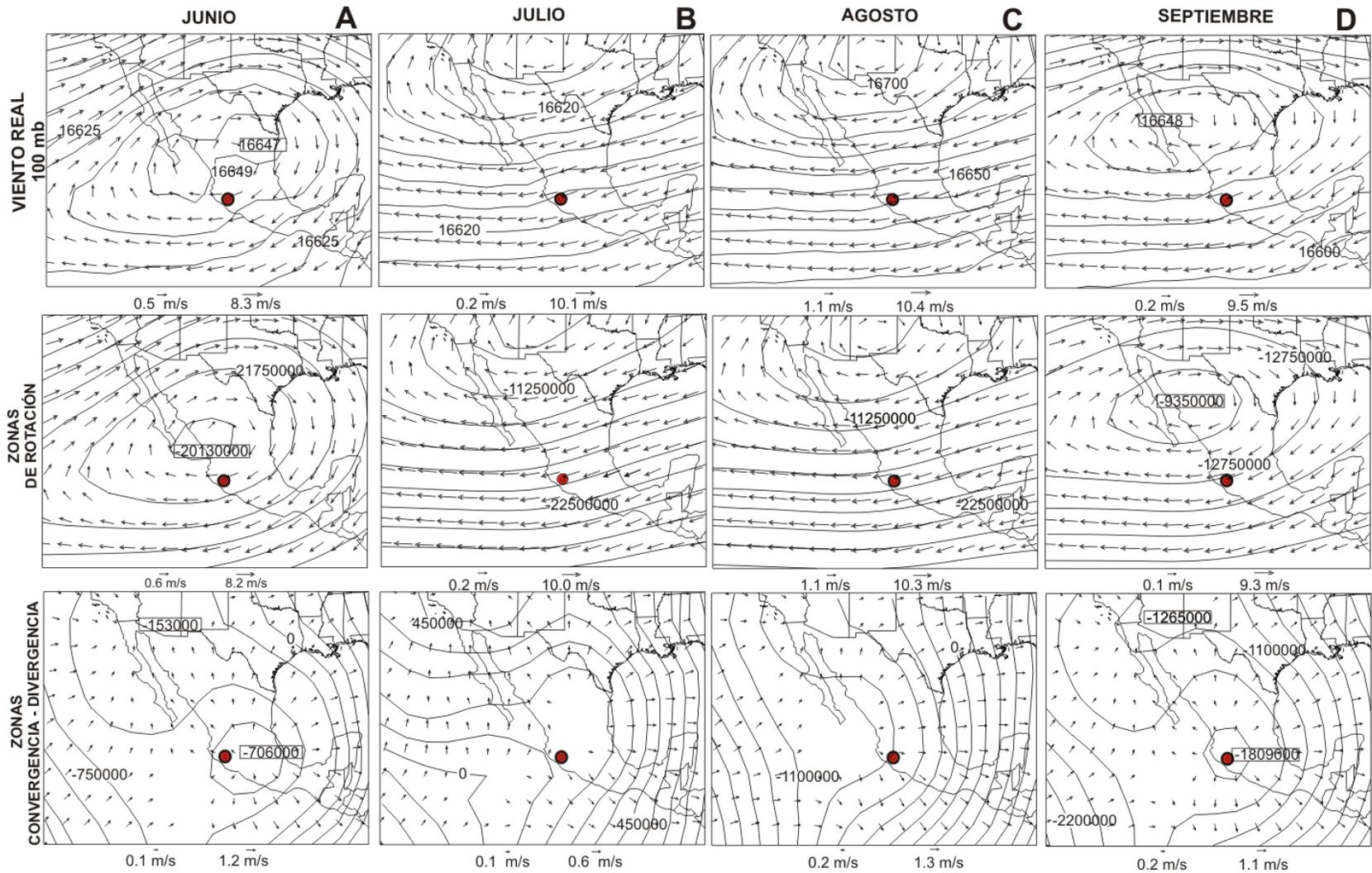


Figura 17. GRUPO III. Campo de vientos a 100 mb. 17A. Circulación anticiclónica asociada al monzón norteamericano en junio. 17B y 17C. Vientos del este y noreste en julio y agosto. 17D. Circulación anticiclónica divergente en el noroeste de México que afecta al área de Colima.

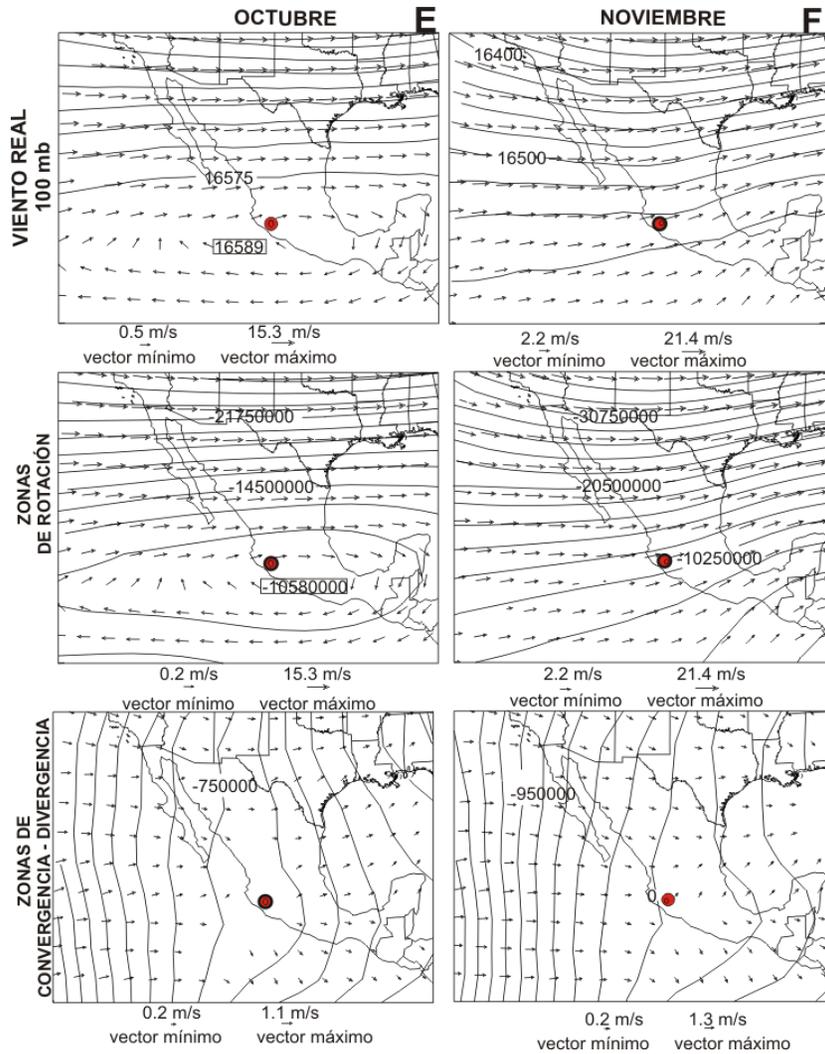


Figura 17E y F. GRUPO II. Campo de viento a 100 mb. 17E. Se observan vientos del oeste y una circulación en octubre. 17F. Circulación de los vientos del oeste en noviembre.

Grupo IV (*estratosfera baja*). Corresponde a los niveles atmosféricos estándar de 70 y 50 mb que van de los 18 000 a 20 000 msnm. A 70 mb (18 000 msnm) se forma una circulación anticiclónica en mayo sobre el Volcán de Colima, predominan vientos del oeste de noviembre a abril y vientos del este de junio a octubre (Figuras 18A y 18B). 50 mb (20 000 msnm) siguen predominando los vientos del oeste de noviembre a marzo y vientos del este de mayo a octubre (Figuras 19A, B y C). Se forma una circulación anticiclónica en noviembre, diciembre y abril, que afecta al Volcán de Colima (Figura 19D). En caso de ocurrir una erupción en estos meses, como consecuencia, las partículas de ceniza podrían circular alrededor de estos dos anticiclones. La velocidad máxima de los vientos va de 17 a 19 m/s en enero y diciembre y la mínima de 0.1 a 0.2 m/s en marzo, septiembre, octubre y noviembre.

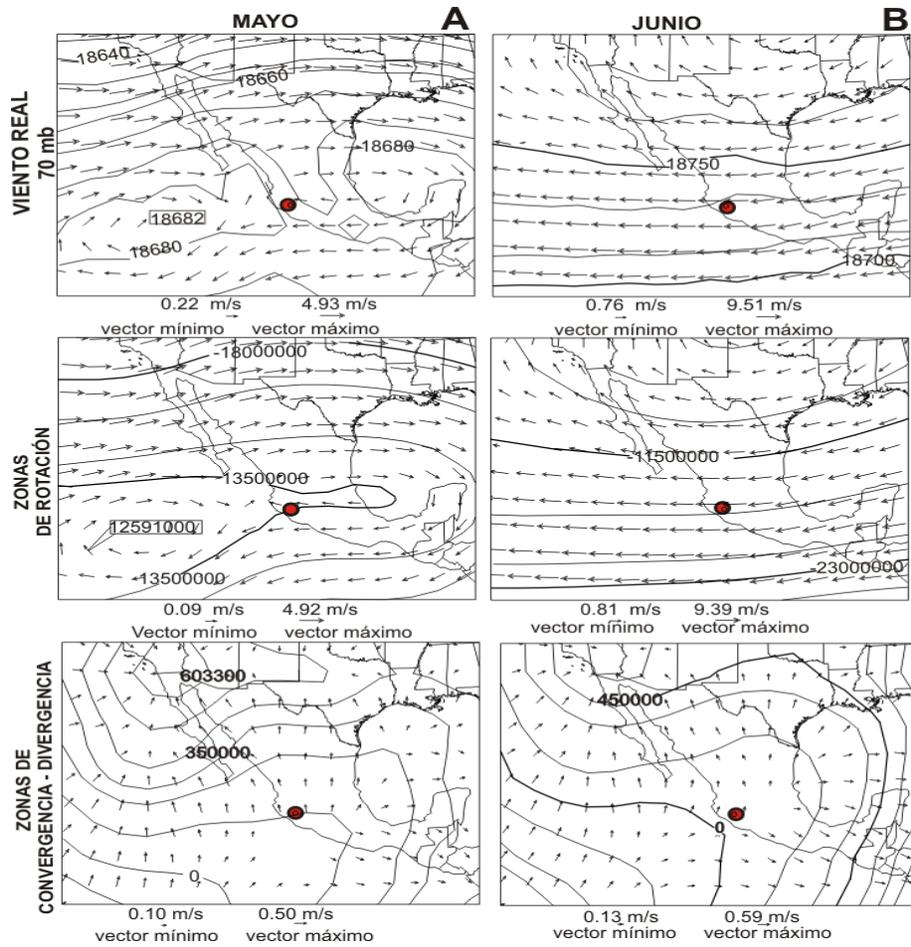


Figura 18A y 18B. GRUPO IV. Campo de viento a 70 mb. 18A. Se observa circulación anticiclónica en mayo. 18B. vientos del oeste en junio.

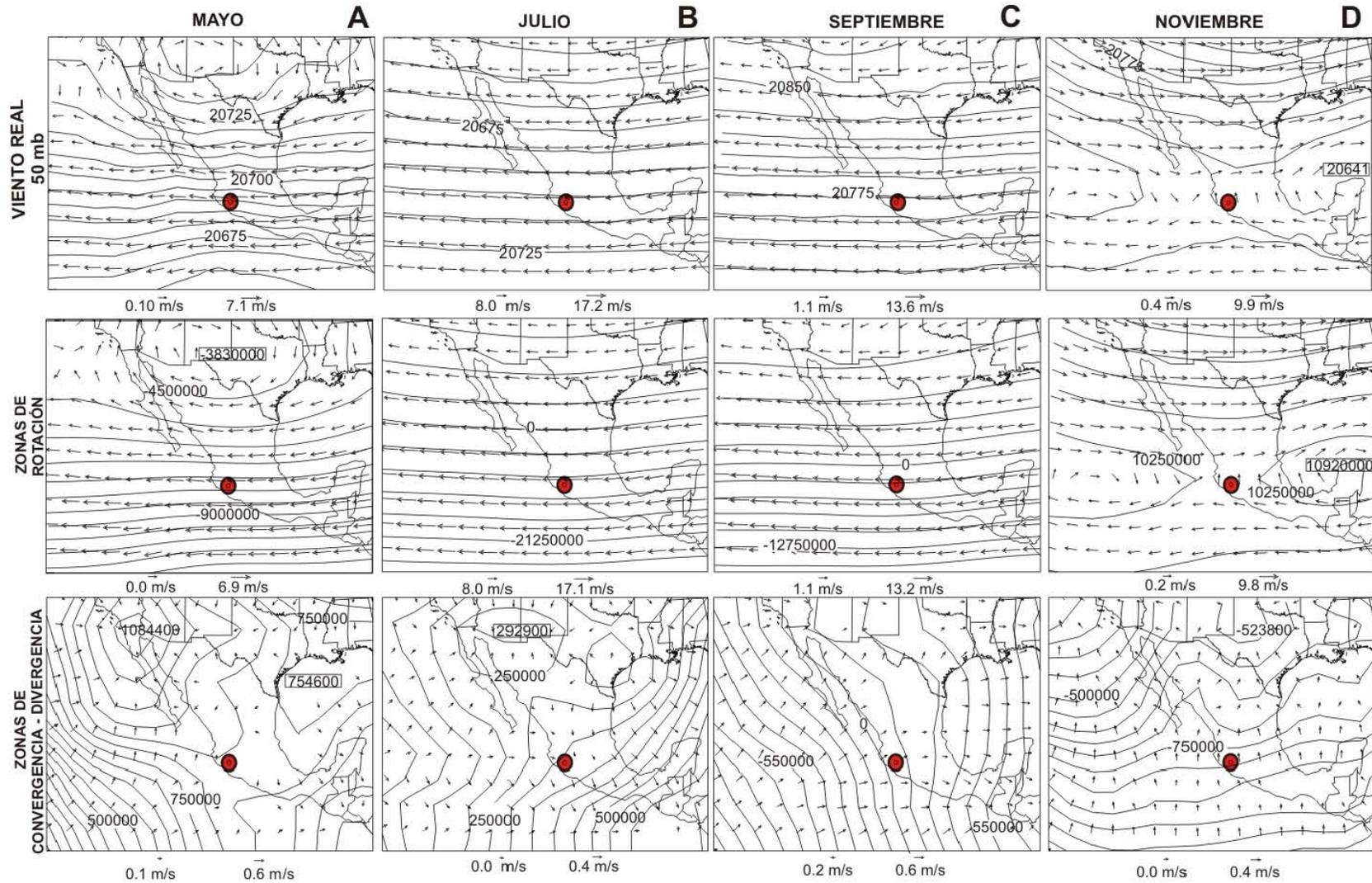


Figura 19. Campo de viento a 50 mb. GRUPO IV. 19A. 19B y 19C En mayo, julio y septiembre se presentan vientos del este. 19D. Los vientos del oeste dominan en noviembre.

Grupo V (*estratosfera media*). El grupo cinco está formado por los dos niveles de presión estándar establecidos en la base GGUAS que van de 30 a 10 mb y abarcan de los 23 000 a 30 000 msnm. De 30 a 10 mb (23 000 a 30 000 msnm), en la zona del Volcán de Colima se identifican vientos del este y sureste de abril a octubre (Figura 20A, 20B y 20C) y vientos del oeste de noviembre a marzo (Figura 20D). Se presenta una variación en este patrón a 30 mb (23 000 msnm), ya que dominan los vientos del este en noviembre y una circulación anticiclónica en abril, noviembre y diciembre (Figura 21A y 21B) y a 10 mb en abril y octubre. En caso de ocurrir una erupción en estos meses con una columna mayor a 23 000m de altura, las partículas finas pueden cambiar de dirección y permanecer mayor tiempo en la atmósfera por la trayectoria en espiral que se puede formar; esto puede ocasionar que se tenga un área más amplia de dispersión. La intensidad de los vientos varía de 0.1 en enero-marzo y noviembre a 21-28 m/s en julio y agosto.

En la Figura 23 se muestra el vector de la componente media mensual del área de influencia del Volcán de Colima de 500 a 10 mb. Se puede observar que de 500 a 100 mb (5 000 a 16 000 msnm), dominan los vientos del oeste y suroeste de octubre a mayo, se observan vientos del noreste, este y sureste de junio a septiembre y están asociados a las circulaciones anticiclónicas. A 70 mb (18 000 msnm) se presentan vientos del oeste de noviembre a abril, vientos del este de mayo a octubre. A los 50 mb (20 000 msnm) se observan vientos del oeste de diciembre a marzo y vientos del este de mayo a octubre y se presenta una circulación anticiclónica en abril, noviembre y diciembre. A 30 mb (23 000 msnm) se presentan vientos del oeste de noviembre a marzo y vientos del este y sureste de abril a octubre, se forma una circulación anticiclónica en abril, noviembre y diciembre. A 10 mb (30 000 msnm), se observan vientos del oeste y suroeste de noviembre a marzo y del este de noviembre a marzo y se presenta una circulación anticiclónica en abril y octubre.

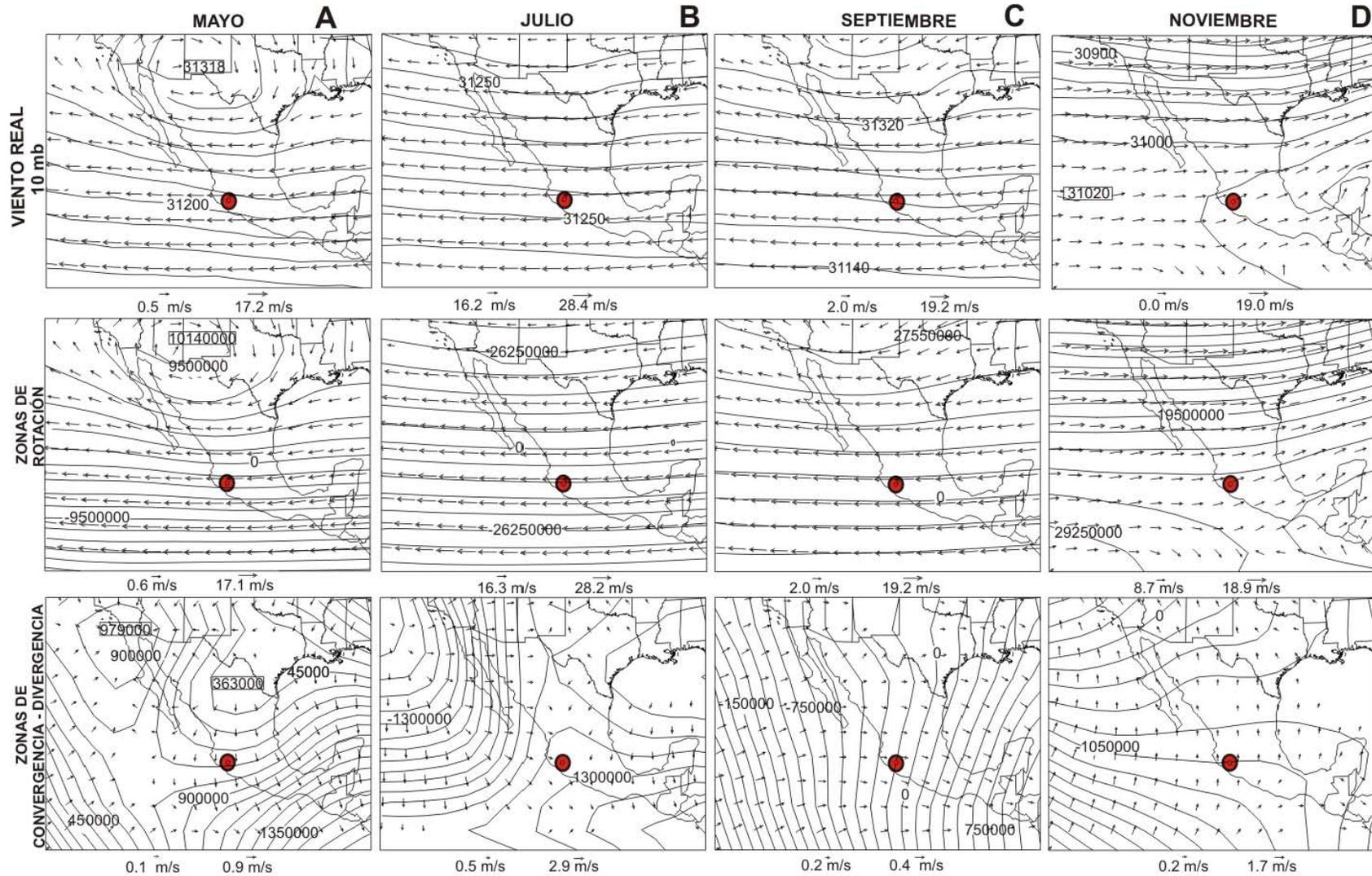


Figura 20. GRUPO V. Campo de viento a 10 mb. 20. 20B y 20C. En mayo, julio y septiembre predominan vientos del este con divergencia anticiclónica. 20D. En noviembre se presentan vientos del oeste.

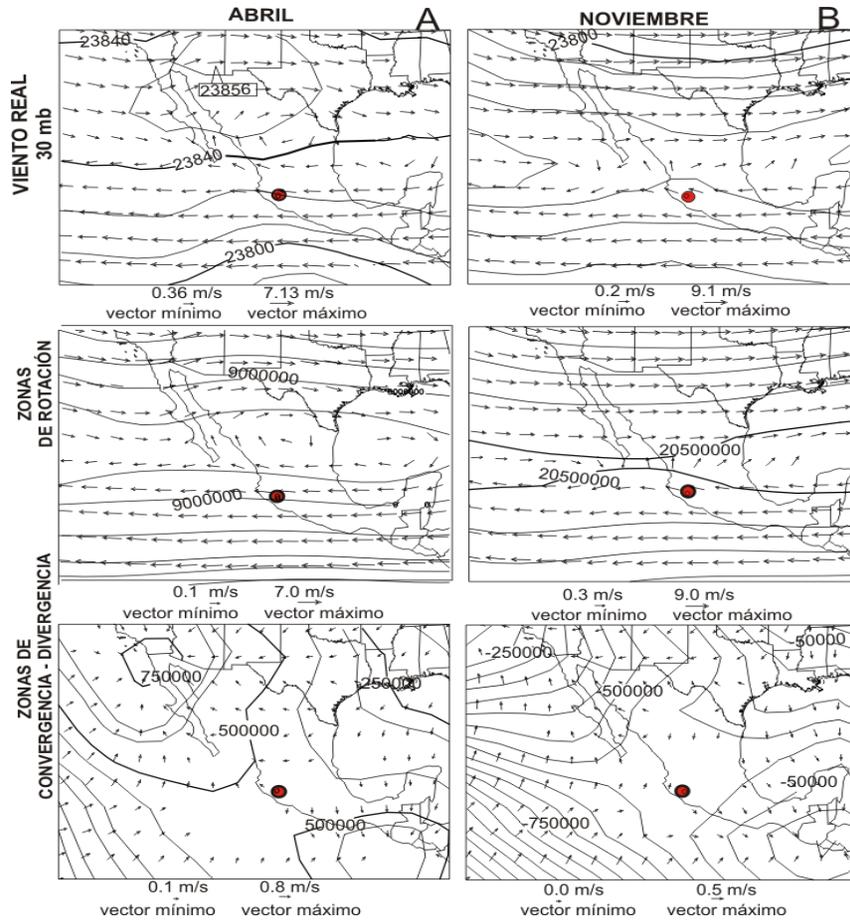


Figura 21 GRUPO V. Campo de viento a 30mb. 21A. Se observa circulación anticiclónica en abril. 21B. vientos del oeste sobre el volcán y circulación anticiclónica en el centro de México.

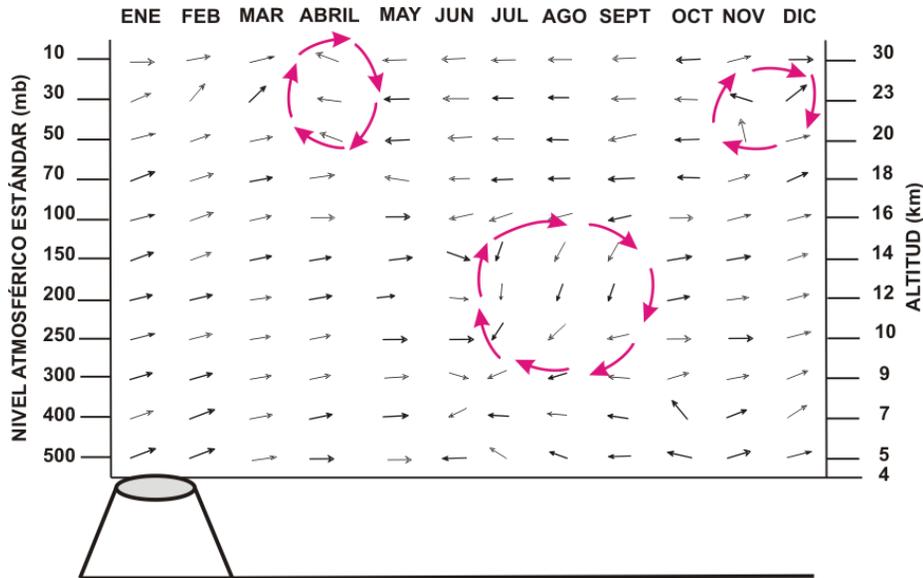


Figura 22. Campo de viento para el Volcán de Colima muestra la componente media mensual del viento a cada 2.5° por 2.5° de los 500 mb hasta 10 mb.

Fonseca y Martin Del Pozzo, (2010) propusieron un análisis vertical del viento local e identificaron 7 escenarios para un evento pliniano a partir de la frecuencia diaria mensual de los radiosondeos de Manzanillo (1990-2005) de 17 000 a 28 000 msnm. Los resultados son congruentes con la componente principal diaria mensual del viento local de Manzanillo y la componente media mensual del viento para cada 2.5° de latitud y longitud de México obtenida con la adaptación del modelo del campo de viento horizontal. Los resultados de ambos trabajos muestran que en caso de ocurrir una erupción con una columna mayor a 23 km de altura, la nube volcánica puede dispersarse hacia el este o noreste de diciembre a marzo, pero de acuerdo con la circulación local, los vientos pueden cambiar de dirección hacia el oeste en noviembre y diciembre por las circulaciones anticiclónicas que se forman sobre el Pacífico y Península de Yucatán. La ceniza puede dispersarse al oeste o noroeste si la erupción ocurre de abril a octubre, sin embargo, la circulación local indica que puede desplazarlas hacia el este en abril y octubre, ya que se presenta una circulación anticiclónica en estos meses.

De acuerdo con la dirección y velocidad del campo de viento los escenarios de mayor probabilidad de caída son:

Escenario 1. De enero a marzo, el área de mayor riesgo para caída de ceniza al noreste con 55% de probabilidad de ocurrencia (Figura 23), lo que coincide con la dirección de la caída, de la erupción de 1913. También se registran variaciones hacia el nor-noroeste (15%), noroeste (15%) y sur (15%).

Escenario 2. En abril, existe el 40 % de probabilidad de que la ceniza se disperse hacia el este. También se presentan direcciones secundarias al este-noreste (15 %), norte (12 %), noreste (5 %), y oeste (5 %), oeste-noroeste (5 %), sur-suroeste (3 %), nor-noreste (3 %), noroeste (3 %), sur (3 %) y sureste (3 %) y sur-sureste (3 %). En octubre el área de mayor afectación por caída también es hacia el E con 50 % de probabilidad de ocurrencia. En este mes hay variaciones hacia el este-noreste (25 %) y noreste (25 %).

Escenario 3. En mayo la zona de mayor probabilidad de ocurrencia es al nor-noreste con el 23 %. Se presentan variaciones hacia el sur-suroeste (11 %), noreste (11 %), sur-sureste (11 %), este-sureste (11 %), oeste-noroeste (11 %).

Escenario 4. Este escenario también se identifica en el mes de mayo hacia el nor-noroeste y presenta una probabilidad igual correspondiente al 23%.

Escenario 5. En junio-julio-agosto, el área con mayor probabilidad de caída de ceniza es al noroeste con 25 %, pero se presentan variaciones al oeste-suroeste (18 %), oeste (17 %), norte (12 %) oeste-noroeste (7 %) y este-noreste (7 %).

Escenario 6. En septiembre, la zona de mayor afectación es el oeste con 31 % de probabilidad de ocurrencia; sin embargo el viento puede mover la ceniza al noreste (24 %), sur (18 %), norte (12%), este-noreste (7 %) y oeste-noroeste (8 %).

Escenario 7. En noviembre-diciembre existe el 27 % de probabilidad de que la ceniza se disperse al oeste-suroeste. Las direcciones secundarias que se presentan son suroeste (16 %), sur (16 %), sur-suroeste (11 %), este-noreste (11 %), noreste (10 %), sureste (9 %).

Los escenarios propuestos para la caída de ceniza se estimaron para una columna de alrededor de 23 km de altura y en caso de presentarse un fenómeno atmosférico extraordinario (el niño, la niña, huracanes, tormentas tropicales) podrían tener variaciones.

Si la columna es mayor a 23 km la distribución de la ceniza podría ser similar a los escenarios propuestos, sin embargo, una columna de menor altura podría tener una dispersión distinta.

5.2. REFERENCIAS

-Fonseca, R., y Martin Del Pozzo, A. L. (2010). Ash-fall hazard from a Plinian Eruption at Colima Volcano, Mexico. *Annals of Geophysics*. 53, 5-6, 51-81. doi: 10.4401/ag-4872

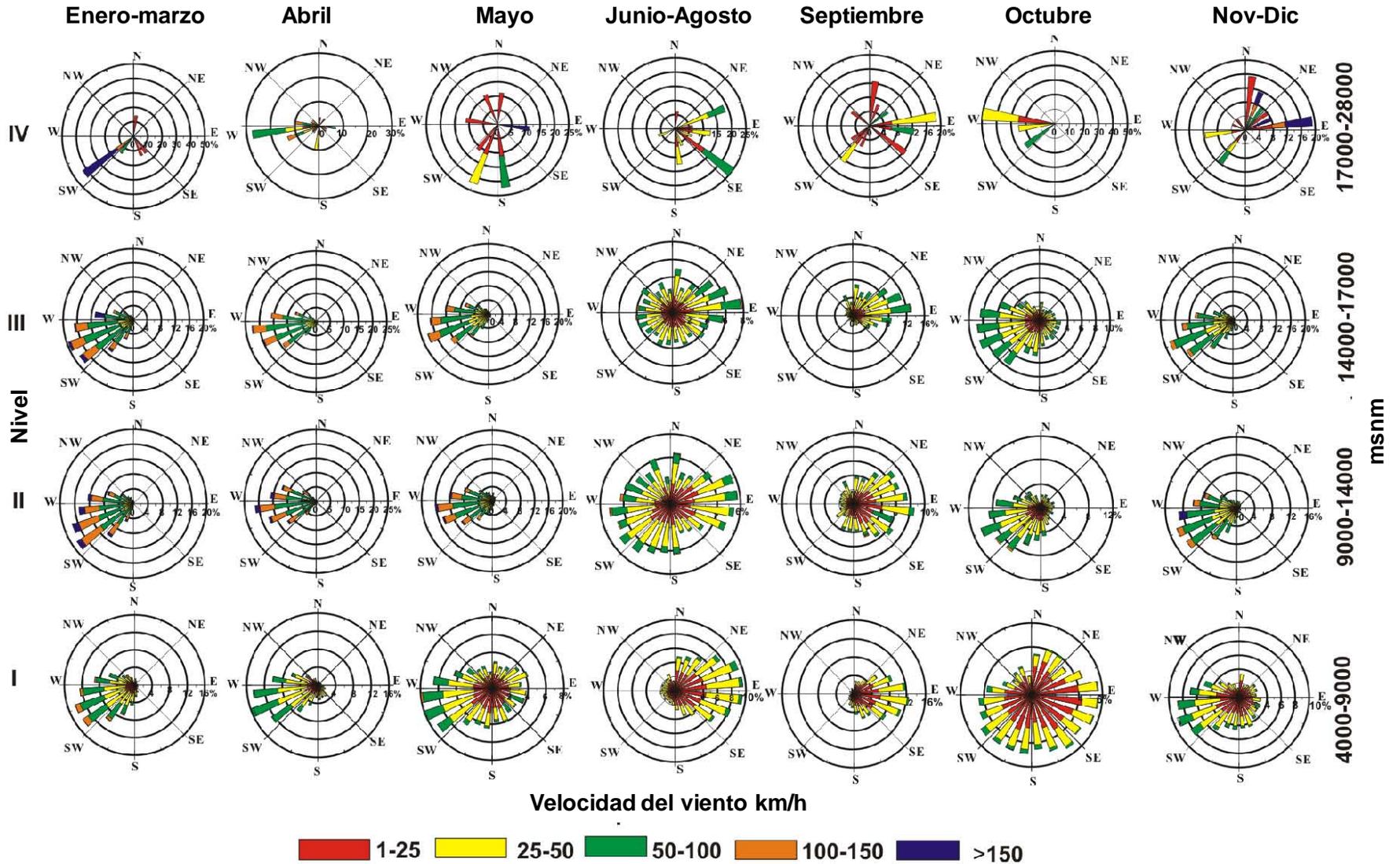


Figura 23. Dirección del viento diaria mensual (1990-2005) para cuatro niveles de altitud, Manzanillo

CAPÍTULO 6. ESCENARIOS PARA CAÍDA DE CENIZA

El objetivo central de este trabajo fue identificar los escenarios y localidades vulnerables por la caída de ceniza de un evento pliniano y estimar los efectos probables para cada escenario. Este objetivo se logró a partir de la integración de la actividad histórica y actual del Volcán de Colima; reconstrucción de las isopacas de la erupción de 1913 basada en registros históricos y reconocimiento de campo; campo de viento vertical diario mensual complementado con los resultados del modelo atmosférico y datos de población, actividad económica e infraestructura básica por localidad.

6.1. Estimación de escenarios

El trabajo de campo fue necesario para identificar los depósitos de caída de las erupciones de 1818 y 1913 y su distribución en la zona del Playón, la Becerrera, El Jabalí, San Antonio, Atenquique, Zapoltitic, San José del Carmen, Ciudad Guzmán, Colima y Guadalajara. En la Figura 24A se muestran las isopacas reconstruidas con los espesores de 100, 50, 15 y 1cm y la figura 24B, las de 0.5, 0.1 y 0.01 cm.

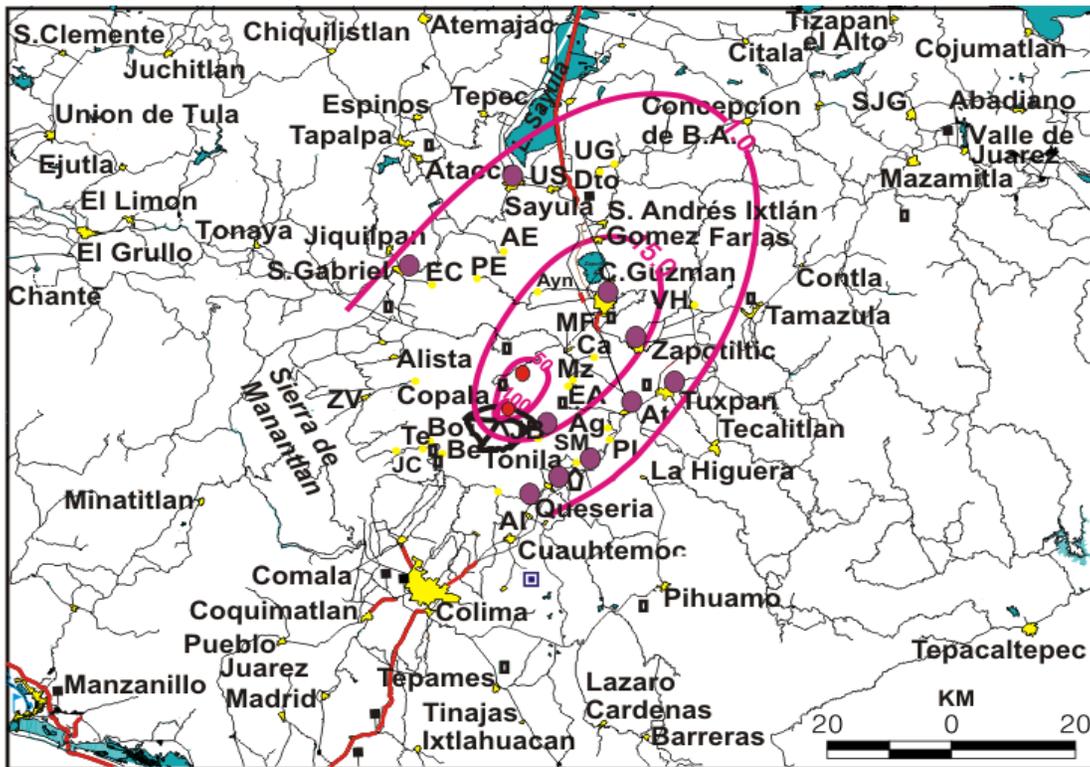


Figura24A. Isopacas de 100, 50, 15.0 a 1.0 cms de la erupción del 20 de enero de 1913.

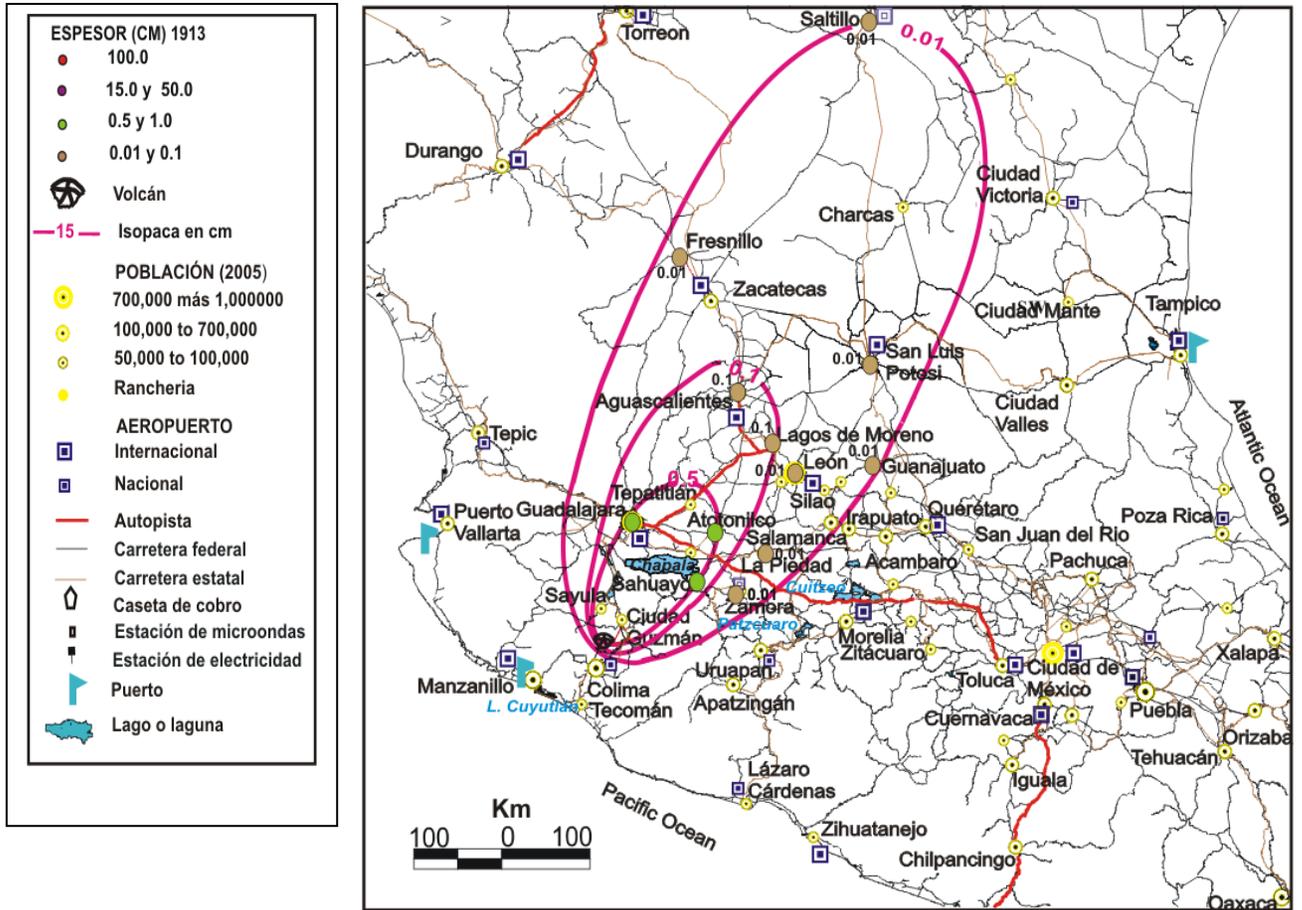


Figura 24B. Isopacas de 0.5, 0.1 y 0.01 cm de la erupción de 1913.

Los resultados del modelo del campo de viento regional horizontal basados en la dirección y velocidad media mensual para cada 2.5 grados de latitud y longitud, se complementaron con el viento vertical diario mensual de las estaciones meteorológicas Manzanillo y Guadalajara.

Se propusieron 7 escenarios para un evento pliniano de acuerdo con la dirección del viento dominante local de 17 000 a 28 000 msnm. Se agruparon los meses de enero-febrero-marzo; abril-octubre; junio-julio-agosto y noviembre-diciembre porque tuvieron direcciones y velocidades similares. Los meses de mayo y septiembre tuvieron un comportamiento diferente.

Los efectos para cada uno de los escenarios se estimaron mediante la extrapolación de las isopacas de la erupción de 1913. La revisión detallada de la información histórica y actual sobre la actividad del Volcán de Colima fue necesaria para evaluar el comportamiento eruptivo y reconstruir la distribución de la ceniza a partir de las isopacas de la erupción de 1913.

6.2. Efectos por escenario

Los escenarios mensuales por caída de ceniza se realizaron con la integración del vector dominante de la frecuencia mensual de la dirección del viento del nivel IV (17-28 km de altitud), distribución de isopacas de 1913, características socioeconómicas por ciudad: número total de población por localidad, uso del suelo, actividad económica, estaciones de microondas de radio y TV, tipo de carreteras, número de subestaciones eléctricas, aeropuertos internacionales y nacionales y tipo de carreteras. En la tabla 4, se muestra el impacto esperado para cada uno de los escenarios por isopaca y alcance. Los efectos varían conforme aumenta la distancia con respecto al cráter y pueden consultarse en el artículo anexo de Fonseca y Martin Del Pozzo (2010) donde se describe detalladamente el impacto para cada uno de los escenarios. En las isopacas de 100 y 50 cm de lapilli y ceniza el mayor impacto sería para el bosque, pastizal y fauna local para los 7 escenarios.

Escenario 1

De enero a marzo, la dirección dominante del viento es hacia el noreste (Figura 25).

100 cm

Alrededor de 100 cm de lapilli y ceniza puede depositarse a 3 kms al noreste del volcán. El material caería principalmente en la parte norte del Volcán de Colima “El Playón” y en los flancos norte y sur del Nevado de Colima. En esta área se encuentra bosque de pinos y encinos. Los pinos maduros pueden sobrevivir como ocurrió en 1913, aunque las ramas pueden romperse debido al peso de la ceniza. Los árboles pequeños quedarían sepultados. Muchos animales como pumas, gato montés, ocelotes, venados y especies de aves como halcones y colibríes en peligro de extinción (López Vilchis et al., 1990); podrían morir asfixiados. La caída de tefra también mataría a los insectos y reptiles ya que la ceniza por ser abrasiva, daña a la capa epicuticular de los insectos y les causa deshidratación y muerte

Impacto de la caída de ceniza del Volcán de Colima

(Cook et al., 1981). Por otro lado, los balísticos incandescentes pueden ocasionar incendios y la estación sísmica al norte del cráter puede ser destruida. Existe poco peligro por lahares porque esta época es seca (Tabla 4).

IMPACTO	ESCENARIOS																																																
	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7														
	100 cm espesor							50 cm							15 cm							> 1 cm							0.5 cm							0.1 cm							0.01 cm						
Fauna																																																	
Arboles pequeños cubiertos	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x																																			
Ramas caídas	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x																																			
Pastizal cubierto o calcinado	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x																					
Incendios por balísticos	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x																																			
Fauna																																																	
Muerte por asfixia o deshidratación	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x																																			
Cuerpos de agua																																																	
Cambios de pH agua															x														x	x	x	x																	
Contaminación															x														x	x	x	x																	
Muerte de peces															x														x	x	x	x																	
Población																																																	
Problemas respiratorios/oculares															x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x							
Problemas piel															x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x							
Estrés															x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x							
Equipo																																																	
Daño a equipo monitoreo																																																	
Daño a alarmas/lahares																																																	
Viviendas																																																	
Colapso de techos															x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x							
Limpieza de techos															x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x							
Agricultura																																																	
Sepultamiento de cultivos															x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x														
Ganadería																																																	
Muerte de ganado															x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x																					
Enfermedades gastrointestinales															x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x							
Industria																																																	
Obstrucción de chimeneas															x	x	x					x																											
Daños a maquinaria															x	x	x					x																											
Interrupción de actividades															x	x	x					x							x																				
Carreteras																																																	
Cierre por horas/días															x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x														
Falta de visibilidad															x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x							
Infraestructura																																																	
Interferencia en estaciones/radio-TV															x							x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x							
Daños a transformadores															x	x	x	x				x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x														
Interrupción de energía eléctrica															x	x	x	x				x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x														
> contaminación/refinería-termoeléctrica																																				x							x	x	x	x	x	x	x
Aeropuertos																																																	
Cierre de aeropuertos																																				x							x	x	x	x	x	x	x
Cancelación de vuelos																																				x							x	x	x	x	x	x	x
Desviación de rutas aéreas																																				x							x	x	x	x	x	x	x

Tabla 4. Impactos esperados por escenario.

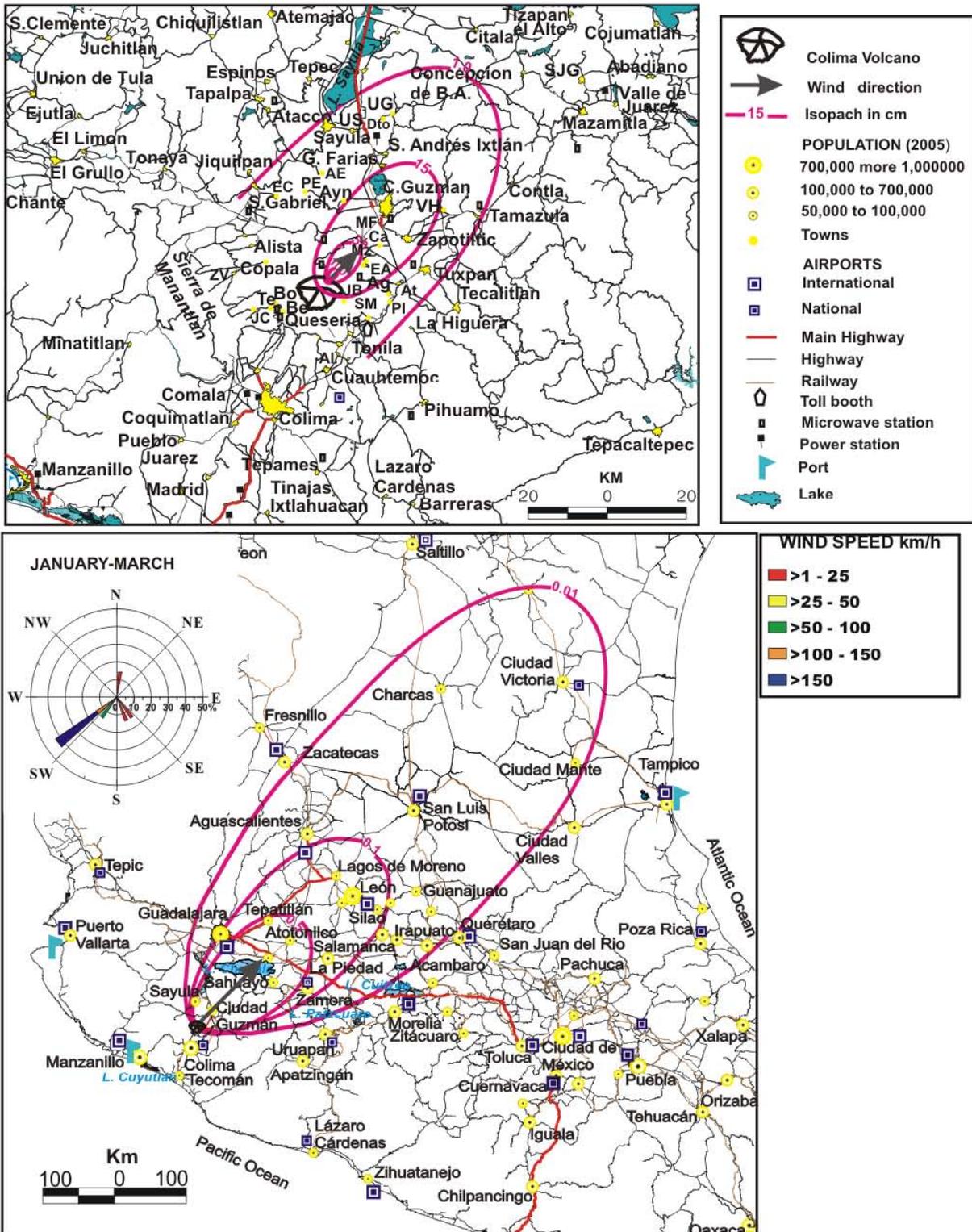


Figura 25. Escenario 1, para una erupción pliniana si ocurre de enero a marzo, el área del noreste sería afectada. Se muestran dos escalas de mapas con base a las isopacas proximales y distales.

50 cm

De 50 a 100 cm de ceniza pueden depositarse entre 3 y 11 kms. Esta zona está cubierta por bosques de coníferas asociada con los pastizales naturales. Las cenizas pueden tapar a los árboles pequeños y romper las ramas de los árboles maduros. Los animales silvestres, especialmente las aves podrían morir. En esta zona se encuentra un área de campismo de alta montaña muy visitado y esta actividad podría quedar paralizada totalmente. El equipo de monitoreo sísmico y visual que está en el Volcán Nevado a 5.3 km del cráter Colima y la estación de microondas de radio y TV en el flanco norte del Nevado pueden ser destruidas (Tabla 4).

15 cm

De 15 a 50 cm de ceniza pueden caer entre 11 y 38 kms. En esta área, más de 100 000 habitantes (INEGI, 2005), estarían sujetos a la abrasión de corneas, irritación de ojos, piel, nariz, cuero cabelludo y a problemas de las vías respiratorias, así como al estrés (Horwell et al., 2006, Nieto et al., 2007). También en esta zona hay más de 30 000 viviendas con techos contruidos de teja (19,298), lámina de asbesto (2,472), loza (14,426), cartón (554), palma (148) y material de desecho (22) (INEGI, 2005). Un tercio de estos techos se podrían derrumbar bajo el peso de la ceniza. La actividad agrícola y ganadera sería afectada. La ceniza puede enterrar a los cultivos en etapa inicial de crecimiento y causar la defoliación de los árboles frutales. El ganado puede enfermar o morir por ingerir pasto y agua contaminada. En 1818 y 1913 la ceniza causó el colapso de techos en Ciudad Guzmán y el ganado murió después de ingerir agua y pastos contaminados por la ceniza (Waitz, 1932).

Los manantiales de Juan Barragán y Ejido Atenquique pueden contaminarse y la tubería que suministra agua potable a la población local puede quedar bloqueada o dañarse por la ceniza, como ocurrió en Ciudad Guzmán en la erupción de 1913. Las estaciones de radio y TV de microondas en el flanco noroeste del volcán y las subestaciones eléctricas en Ciudad Guzmán, que abastecen de energía eléctrica a la zona metropolitana de Guadalajara pueden tener interferencia o dañarse los cables. El sistema de alarmas para los lahares que se encuentran en Juan Barragán y Atenquique sería dañado. Las carreteras principales (Colima-Guadalajara) y terracerías también podrían cerrarse debido a la falta de visibilidad;

los vehículos podrían tener daños en los filtros de aire, aceite y combustible, lo que limitaría la respuesta efectiva de los servicios de emergencia. Las erupciones de 1770, 1818 y 1913 del Volcán de Colima fueron acompañadas de oscuridad. El 18 de mayo la erupción del Monte Santa Helena, provocó que estuvieran cerrados por semanas 100 kms de caminos rurales del distrito de riego (Schuster, 1982).

La Laguna de Zapotlán se encuentra a 30 km al noreste del volcán, humedal de importancia internacional debido a la presencia de plantas acuáticas, aves migratorias, insectos y peces en peligro de extinción. La ceniza podría generar cambios en el pH del agua y provocar la disminución del suministro de alimentos; algunos peces son muy susceptibles a los cambios de agua y podrían morir.

> 1 cm

De 1 a 15 cm de ceniza se pueden depositar entre 38 y 64 kms. En esta zona viven 70 000 personas (INEGI, 2005). La ceniza ocasionaría los mismos efectos en la población como irritación de ojos, piel y problemas respiratorios. De 10 000 viviendas, 368 cuentan con techos de láminas de cartón y están sujetas al colapso de techos. El ganado puede enfermarse o morir por la ingestión de pastos y agua contaminados. La ceniza puede dañar las chimeneas y techos del ingenio azucarero de Quesería y de la fábrica de papel en Atenquique. Las carreteras Colima-Guadalajara y Tuxpan-Mazamitla tendrían falta de visibilidad y acumulación de cenizas durante horas o días. Las subestaciones eléctricas de Tamazula y Sayula pueden dejar de funcionar temporalmente debido a posibles cortos circuitos, daños a los cables y fusibles.

0.5 cm

De 0.5 a 1 cm de ceniza se puede esperar entre 64 y 160 kms. En este radio hay más de 4 000 000 de personas que viven en la zona metropolitana de Guadalajara y en pequeñas localidades. Guadalajara ha tenido ceniza en erupciones como la de 1711, 1770 y 1913, debido a la densidad de población actualmente el efecto económico y social sería mayor. Los techos de las viviendas requerirán de ser limpiados. Los cultivos de maíz y hortalizas

podrían resultar dañados. El ganado puede enfermarse por comer pasto contaminados de ceniza.

Guadalajara es la segunda ciudad más grande en México y cuenta con uno de los aeropuertos con mayor tráfico internacional, 136 000 vuelos/año (INEGI, 2007). La nube de ceniza obligaría a cerrar operaciones por días y causar la desviación de las rutas aéreas ocasionando saturación en las pistas alternas. La acumulación de cenizas en las pistas del aeropuerto y plataformas necesitarían limpiarse. En 1990, la ceniza del volcán Redoubt (Alaska) se mantuvo en la atmósfera y en el espacio aéreo, el aeropuerto de Anchorage Kenai ubicado a 80 km del volcán permaneció cerrado varios días (Casadevall, 1994).

En esta área se encuentran carreteras en Colima que conectan ciudades importantes como Guadalajara, Manzanillo, Ciudad Guzmán, León, Morelia y Ciudad de México. La falta de visibilidad debido a la caída de ceniza podría causar problemas de tráfico. Las subestaciones de Guadalajara y Atotonilco dan suministro de electricidad a más de un millón de usuarios. Las torres y los cables pueden ser dañados por las cenizas y causar cortes de energía y apagones durante horas o días. El sistema de alarmas para lahares en San Marcos también puede dañarse. El Lago de Chapala, considerado el más grande de México, es un hábitat para varias especies de aves migratorias (pelícano blanco), así como plantas y animales nativos. El lago cuenta con programas de conservación para mantener los hábitats naturales. Durante la caída de ceniza puede obstaculizarse el vuelo de las aves. La sedimentación de las cenizas puede ocasionar una severa contaminación en el lago, modificar las condiciones de pH y los nutrientes.

0.1cm

De 0.1 a 0.5 cm de ceniza puede llegar a depositarse entre 160 y 390 kms al noreste del cráter. Más de 1 000 000 de habitantes puede tener problemas respiratorios debido a la inhalación de la ceniza fina. La ceniza podría tener efectos positivos en algunas zonas agrícolas, pequeñas cantidades actuarían como fertilizantes naturales. El ganado puede enfermarse de diarrea y perder peso, lo que reduciría la producción de carne y leche (Fonseca et al., 2007). La carretera Panamericana que conecta a la Ciudad de México,

Morelia, Querétaro, Irapuato y León tendría problemas de tráfico hacia Guadalajara. Las subestaciones eléctricas en León y en Zamora podrían tener daños mínimos por la ceniza fina. La ciudad de León tiene un aeropuerto internacional con 27 206 vuelos/año (INEGI, 2007). El aeropuerto se vería obligado a interrumpir las operaciones por la dispersión de la ceniza en el espacio aéreo, además tendría retrasos o cancelación de los vuelos por horas o días, desviación de rutas aéreas y también sería necesario limpiar las aeropistas.

0.01 cm

De 0.01 a 0.1 cm de espesor entre 390 y 725 kms. En esta área se identificaron más de 2 000 000 de habitantes (INEGI, 2005). Los efectos en los cultivos serían pocos porque la ceniza sería incorporada al suelo en pocos días o ser arrastrada por el viento. Las termoeléctricas de Salamanca y San Luis Potosí, la industria petroquímica y las refinerías de Salamanca son una fuente importante de ingresos en esta región. La dispersión de la ceniza fina podría aumentar la contaminación en el medio ambiente agudizando los problemas respiratorios e irritación de ojos en la población. Los aeropuertos internacionales de Aguascalientes, San Luis Potosí y Ciudad Victoria tienen entre 11 506 y 23 071 vuelos/año (INEGI, 2007), mientras que Celaya cuenta con 2 400 vuelos nacionales/año (INEGI, 2007). Las cenizas finas en el aire darían lugar a retraso o cancelaciones de vuelos. Los efectos serían pocos en la carretera Panamericana y en las subestaciones eléctricas en San Luis Potosí y Saltillo (Tabla 4).

Escenario 2

En abril y octubre el viento dominante va hacia el este (Figura 26). El área que podría ser afectada es similar a la de 1818, cuando las cenizas cayeron en Ciudad Guzmán, Guadalajara, Lagos de Moreno, León, Guanajuato, Zacatecas, San Luis Potosí, Querétaro y la Ciudad de México (Arreola 1915; Waitz, 1932).

100 cm

Más de 100 cm de lapilli y ceniza puede depositarse en los primeros 3 kms y los efectos serían similares a los mencionados en el escenario 1 con el mismo espesor (Tabla 4).

50 cm

De 50 a 100 cm de lapilli y ceniza pueden depositarse entre 3 y 11 kms. Esta zona tiene características parecidas al escenario 1 dentro de la isópacas de 50 cm y los efectos serían similares (Tabla 4).

15 cm

De 15 a 50 cm de material de caída puede llegar entre 11 y 38 kms. En este radio se encuentran más de 20 000 personas (INEGI, 2005), en localidades pequeñas y los efectos esperados para la población, agricultura y ganadería serían semejantes a los del escenario 1 (Tabla 4). La fábrica de papel Atenquique puede verse afectada porque las chimeneas y los techos pueden ser dañados por la caída de ceniza, así como las materias primas almacenadas a la intemperie. Por otro lado, la acumulación de ceniza en el río Atenquique puede ser una amenaza en la temporada de lluvias por la posible formación de lahares que afectaría a Juan Barragán, San Marcos y Atenquique. Las carreteras (Guadalajara-Manzanillo) y líneas de ferrocarril (oeste de México y Costa del Pacífico) serían bloqueadas por la ceniza. Las estaciones de radio y TV que están al noreste del volcán y en Tuxpan, tendrían problemas de transmisión debido a la interferencia y abrasión de las instalaciones. Las subestaciones de Sayula, Tuxpan y Zapotiltic podrían tener fallas e interrumpir el suministro eléctrico.

>1.0 cm

De 1 a 15 cm puede caer entre 38 y 64 kms. Dentro de esta área viven más de 130 000 personas. Los efectos sobre la población y actividades económicas serían similares a los escenarios con >1.0 cm de ceniza. El pasto forrajero contaminado por la ceniza ocasionaría que el ganado enferme o muera. El ingenio de Quesería también tendría daños (Tabla 4).

El aeropuerto nacional de Colima (5 207 vuelos/año, INEGI, 2007) podría cancelar el servicio por la ceniza sobre el espacio aéreo. La carretera federal y carreteras secundarias que enlazan con las ciudades de Colima, Ciudad Guzmán, Tamazula y ciudades circundantes pueden quedar bloqueadas por horas o días debido a la falta de visibilidad. Las subestaciones eléctricas de Ciudad Guzmán y Tamazula podrían causar cortocircuitos y apagones.

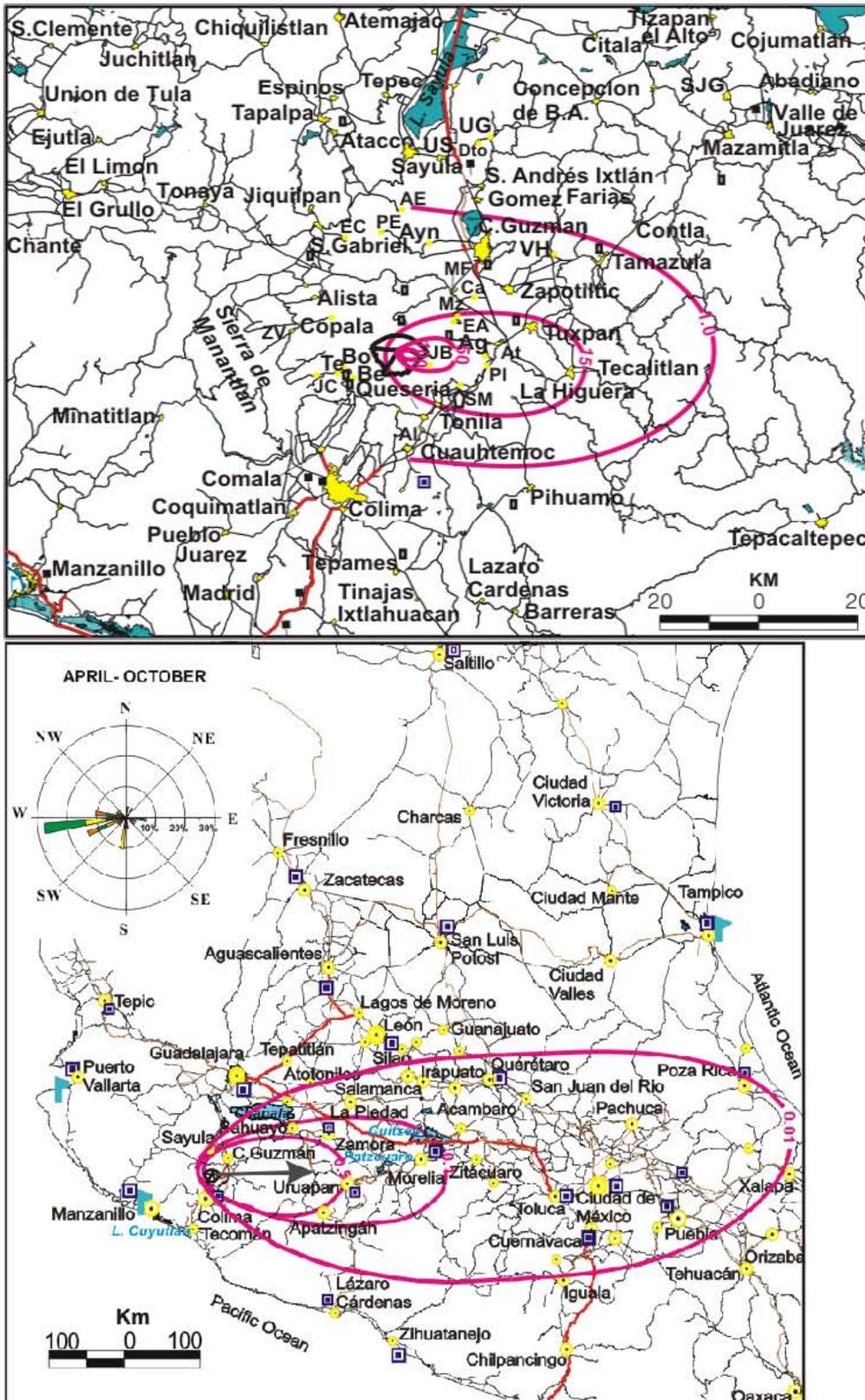


Figura 26. Escenario 2, si la erupción ocurre en abril o en octubre el área de mayor afectación sería el lado este.

0.5 cm

De 0.5 a 1 cm de ceniza podría depositarse entre 64 y 160 kms. En esta área habitan más de 700 000 personas y están sujetas a efectos parecidos a los del escenario 1 con el mismo espesor. Los cultivos de tomate, frijol y avena forrajera y el ganado también presentarían daños por la ceniza (Tabla 4).

Esta zona cuenta con aeropuertos nacionales en Zamora (1061 vuelos/año, INEGI, 2007) y Uruapan (6010 vuelos/año, INEGI, 2007), de modo que la ceniza en la atmósfera obligaría a cerrar los aeropuertos y las aeropistas tendrían que limpiarse. Las autopistas principales Guadalajara-Colima y Morelia-Lázaro Cárdenas que unen al Pacífico con el Centro de México tendrían poca visibilidad y acumulación de cenizas sobre el asfalto. La infraestructura de las subestaciones eléctricas de Colima, Sahuayo, Sayula, Uruapan y Zamora al dañarse ocasionarían apagones en dichas ciudades (Tabla 4).

0.1 cm

De 0.1 a 0.5 cm de ceniza puede llegar entre 160 y 390 kms. En esta área habitan más de 900 000 personas. El impacto en la población y actividades económicas podría ser similar a los escenarios con un 0.1 cm de ceniza (Tabla 4). El aeropuerto internacional de Morelia (18 144 vuelos/año, INEGI, 2007) podría cerrar y parar actividades varios días por la ceniza fina en la atmósfera. Las carreteras de Lázaro Cárdenas-Morelia-México que se conectan con el occidente y centro de México tendrían problemas de tráfico de visibilidad (Tabla 4). Los Lagos de Cuitzeo y Pátzcuaro son dos hábitats vulnerables donde habitan especies en peligro de extinción: pescado blanco y el pato canadiense. La ceniza puede causar efectos en la ecología y calidad del agua de estos cuerpos lacustres. Durante la erupción de 1980 Santa Helena, los lixiviados depositados sobre el lago Richland fueron tóxicos para las algas (Mcknight et al., 1982).

0.01 cm

De 0.01 a 0.1cm de espesor se puede esperar entre 390 y 725 kms. En esta zona viven más de 25 000 000 de personas en Querétaro, Ciudad de México, Toluca, Puebla, Cuernavaca, Pachuca, Tula, Poza Rica incluidas localidades. La ceniza podría causar pocos daños en los

cultivos, ya que se incorpora al suelo en días o semanas e incluso es transportada por el viento. El ganado que pastorea al aire libre podría enfermarse al ingerir pastos con ceniza (Tabla 4). En Salamanca, la industria petroquímica, la refinería y centrales termoeléctricas (incluido el norte de la Ciudad de México) son fuentes contaminantes. La ceniza en la atmósfera ocasionaría mayor contaminación y la población sobre todo de Salamanca podría tener problemas respiratorios.

El efecto en las carreteras principales y caminos secundarios sería poco. Sin embargo, los aeropuertos de la Ciudad de México (355 593 vuelos/año, INEGI, 2007), Puebla (17 277 vuelos/año, INEGI, 2007), Querétaro (12 733 año/año, INEGI, 2007) Toluca (vuelos no especificados) y Cuernavaca (vuelos no especificados), Celaya (2 400 vuelos/año, INEGI, 2007) y Pachuca (3 707 vuelos/año, INEGI, 2007), tendrían cancelaciones de vuelos o desviación de rutas y problemas en las transmisiones por la ceniza fina en el aire.

Escenario 3

En mayo, se identificaron dos escenarios: nornoreste y nornoroeste. El escenario 3 va hacia el nornoreste (Figura 27) y puede tener una distribución similar a la erupción de 1913, cuando la ceniza se registró en San Marcos, Tonila, Quesería, Ciudad Guzmán, Zapotiltic, Tuxpan, Sayula, Guadalajara, Aguascalientes, Fresnillo, Zacatecas, Saltillo y otras localidades (Waitz, 1932).

100 cm

Alrededor de 100 cm de lapilli y ceniza puede caer en un radio de 3 kms al nornoreste del volcán. Los efectos esperados serían parecidos a los del escenario 1 con un espesor de ceniza 100 cm (Tabla 4).

50 cm

De 50 a 100 cm de espesor podría caer entre 3 y 11 km. También se esperan efectos similares al escenario 1 con el mismo espesor, incluyendo el impacto sobre el equipo de monitoreo sísmico y visual y la estación del microondas de radio y TV que están sobre el flanco norte del volcán (Tabla 4).

15 cm

De 15 a 50 cm de piroclastos podrían caer entre 11 y 38 kms. En esta zona viven más de 120 000 personas. El efecto para la población, así como en los cultivos y el ganado sería similar al escenario 1 con el mismo espesor de caída (Tabla 4). La fábrica de cal, cemento y mármol de Zapotiltic tendría daños porque pueden obstruirse las chimeneas y la maquinaria que está al aire libre sufriría de corrosión por la abrasión de las cenizas. El sistema de alarmas de lahares que está en Juan Barragán y Atenquique podría dañarse. Las carreteras Guadalajara-Ciudad Guzmán, Guadalajara-Colima y terracerías quedarían obstruidas.

> 1.0 cm

De 1 a 15 cm de ceniza puede llegar a depositarse entre 38 y 64 kms, donde se encuentran más de 70 000 personas. El impacto esperado en la población, cultivos y ganado serían parecidos a los del escenario 1 con >1.0 cm de caída (Tabla 4). El ingenio de Quesería y la fábrica de papel en Atenquique se dañarían porque las materias primas que se encuentran a la intemperie, las chimeneas y los techos pueden ser dañadas por abrasión y contaminación de la ceniza. Las alarmas para lahares en San Marcos también se dañarían. Las carreteras Guadalajara-Colima-Tuxpan tendrían falta de visibilidad y acumulación de ceniza. Las subestaciones eléctricas en Tuxpan y Sayula abastecen a 43 936 usuarios (INEGI, 2007), durante la caída de ceniza se pueden provocar cortocircuitos en líneas de transmisión. Los rayos pueden interrumpir las transmisiones de radio y TV en la estación de microondas de Tuxpan.

0.5 cm

Alrededor de 0.5 a 0.1 cm de ceniza puede caer entre 64 y 160 kms. En esta área hay más de 4 580 000 personas (INEGI, 2005). La ceniza podría causar efectos similares al escenario 1 con 0.5 cm de ceniza. Las actividades económicas se verían afectadas temporalmente por la falta de servicios y el acceso por carretera (Tabla 4). Las carreteras de Colima, Guadalajara, Manzanillo, Ciudad Guzmán, León, Morelia y Ciudad de México tendrían efectos similares a los del escenario 1. Las subestaciones de Guadalajara, Sahuayo, Ocotlán, Tamazula y Poncitlán abastecen de electricidad a más de 600 000 usuarios (INEGI, 2007). La caída de ceniza podría ocasionar apagones.

El aeropuerto de Guadalajara cerraría operaciones por horas o días. El Lago de Chapala tendría efectos similares al escenario 1 con 0.5 cm de ceniza.

0.1 cm

De 0.1 a 0.5 cm de ceniza podría caer entre 160 y 390 kms. En esta zona hay más de 900 000 habitantes. Esta área es una de las principales productoras de leche del país, abastece al mercado de Guadalajara, Aguascalientes y Distrito Federal. La producción puede disminuir si el ganado ingiere pastos contaminados por la ceniza (Tabla 4). También puede ocasionar problemas de visibilidad y congestión en las autopistas Panamericana, Barra de Navidad-Tampico y México-Guadalajara. Las subestaciones de Aguascalientes y Lagos de Moreno que dan suministro de energía eléctrica a más de 300 000 usuarios (INEGI, 2007), pueden tener algunos apagones por la ceniza fina que se deposite sobre las instalaciones. El aeropuerto internacional de Aguascalientes puede interrumpir sus vuelos o desviar sus rutas por horas o días debido a la ceniza en la atmósfera.

0.01 cm

De 0.01 a 0.1cm de ceniza se podría esperar entre 390 y 725 kms. En esta área, hay más de 3 millones de habitantes en León, San Luis Potosí, Zacatecas, Guanajuato, Saltillo incluyendo pequeñas localidades. Los efectos para la población serían pocos como se menciona en el escenario 1 con el mismo espesor (Tabla 4). Las subestaciones en San Luis Potosí y Saltillo y las principales vías como la carretera Panamericana pueden tener pocos efectos porque la ceniza es transportada por el viento. Los aeropuertos internacionales de León (27 206 vuelos/año, INEGI, 2007), San Luis Potosí (24 430 vuelos/año, INEGI, 2007), Zacatecas (8 257 vuelos/año, INEGI, 2007) y el aeropuerto nacional en Zamora (1 061 vuelos/año, INEGI, 2007), pueden tener cancelación de vuelos o desviación de rutas por la ceniza fina (Tabla 4).

Escenario 4

En mayo, los vientos también pueden soplar hacia el nornoroeste (Figura 28).

100 cm

Más de 100 cm de espesor de lapilli y ceniza pueden depositarse en un radio de 3 kms a partir de la fuente. El bosque de coníferas y la fauna pueden tener los efectos ya planteados en el escenario 1 (Tabla 4).

50 cm

De 50 a 100 cm de lapilli y ceniza se pueden esperar entre 3 y 11 kms. El impacto esperado sobre la vegetación y la fauna sería similar al de los escenarios anteriores con el mismo espesor (Tabla 4). Los depósitos de caída también pueden dañar a la estación radio y TV que se encuentra al norte del Nevado de Colima, además del equipo de monitoreo sísmico y visual que se encuentra a 5.3 kms del cráter.

15 cm

De 15 a 50 cm de ceniza puede caer entre 11 y 38 kms. Más de 4 210 personas (INEGI, 2005) serían afectadas (Tabla 4). La depositación de ceniza podría enterrar a los cultivos (tomate y papas) y los techos de los invernaderos pueden colapsarse. El ganado que se encuentra al aire libre se enfermaría por ingerir pasto y agua contaminada. La subestación eléctrica de San Gabriel y la estación de radio y TV se pueden averiar porque los transformadores y las torres pueden ser dañados por los rayos durante la erupción. La carretera Guadalajara-San Gabriel quedaría bloqueada por la ceniza depositada y tendrían poca visibilidad.

> 1 cm

De 14 a 1 cm de ceniza puede depositarse entre 38 y 64 kms. Alrededor de 150 000 personas (INEGI, 2005), viven en esta área y los efectos sobre la población y actividades económicas pueden ser similares a escenarios anteriores con más de 1 cm. La fábrica de cemento en Zapotiltic también puede verse afectada. La subestaciones de electricidad en Sayula, Ciudad Guzmán, Gómez Farías, Tuxpan y Zapotiltic que dan suministro de electricidad a más 70 000 usuarios (INEGI, 2007) pueden sufrir cortocircuitos en las líneas de transmisión. Las estaciones de radio y TV en Sayula, Tuxpan y Ciudad Guzmán tendrían afectaciones (Tabla 4).

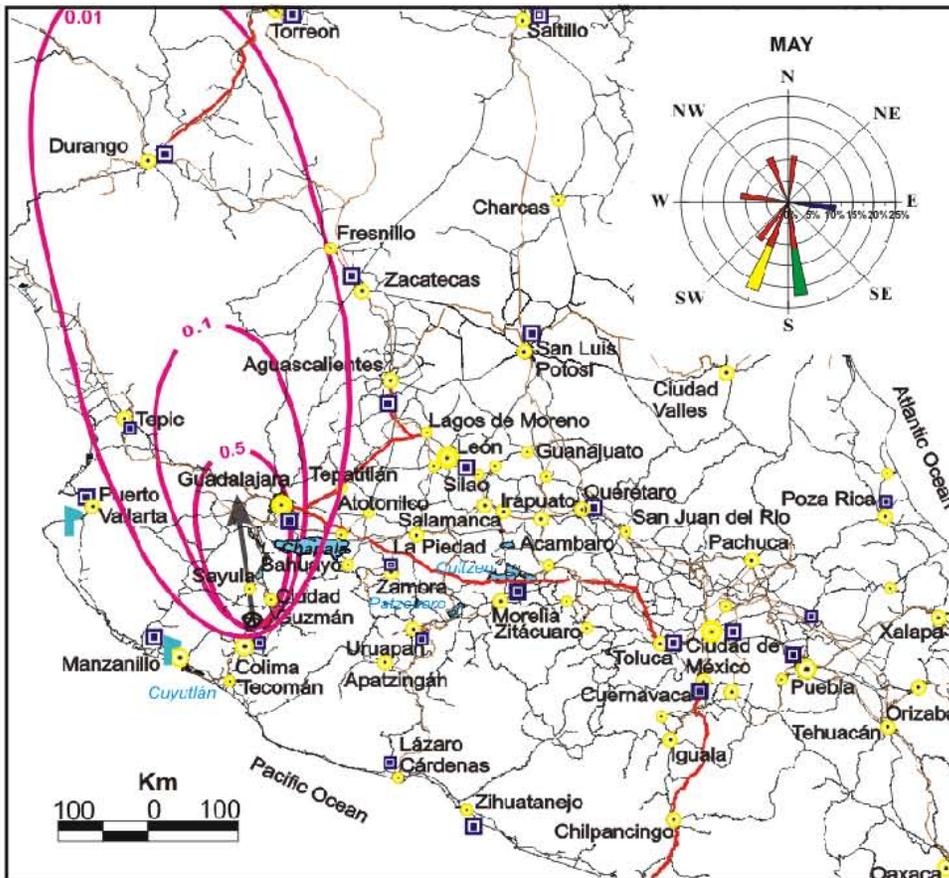
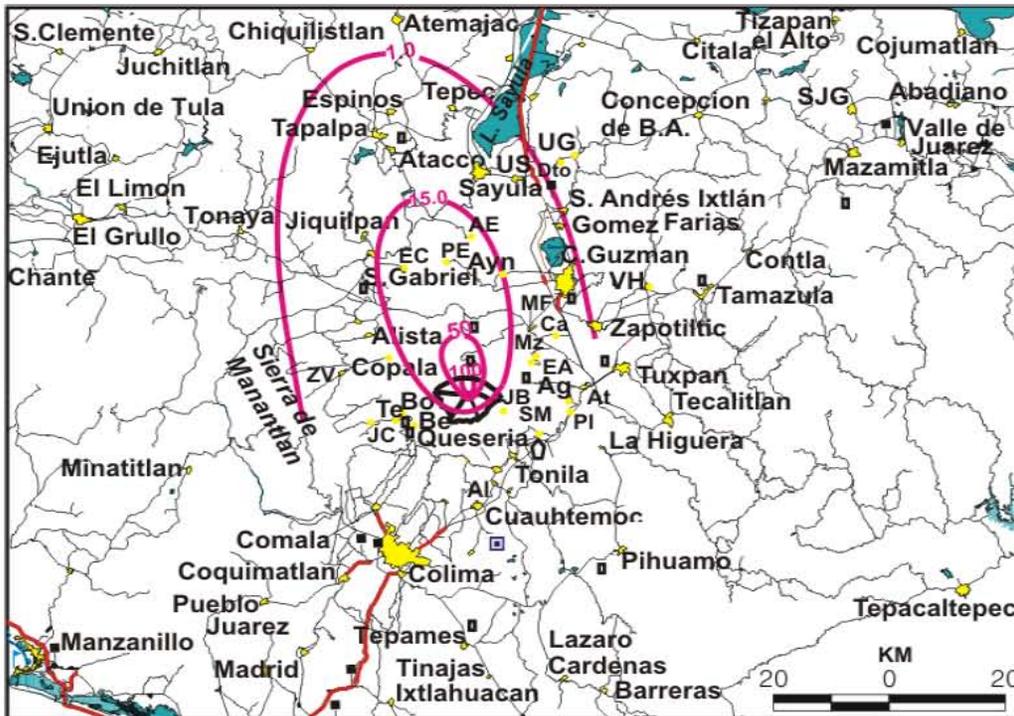


Figura 28. Escenario 4, si la erupción pliniana ocurre en mayo puede afectar el lado noroeste.

Las carreteras principales Guadalajara-Manzanillo, Guadalajara-Sayula y la vía férrea Guadalajara-Nogales que comunica con la costa del Pacífico y centro-norte de México, tendrían problemas de visibilidad y congestionamiento hacia Guadalajara o al Pacífico. Las Lagunas de Zapotlán y Sayula al tener una variación en las condiciones de pH y nutrientes debido a la sedimentación de cenizas, algunas plantas acuáticas nativas y animales morirían.

0.5cm

De 0.5 a 1.0 cm de ceniza se puede esperar entre 64 y 160 kms al nornoroeste del volcán; alrededor de 4 332 049 de personas (INEGI, 2005), viven en esta zona. Los efectos son los mismos al del escenario 1 con 0.5 cm de espesor (Tabla 4). Las carreteras de Guadalajara-Manzanillo y Guadalajara-Saltillo y el aeropuerto internacional de Guadalajara tendrían efectos similares al escenario 1. Las subestaciones eléctricas de Guadalajara, Cuquío, El Grullo, Mazamitla, Unión de Tula y Valle de Juárez abastecen de electricidad a más de 1 millón de usuarios. Las estaciones de radio y TV en Guadalajara, El Grullo y Mazamitla podrían tener interferencia. El Lago de Chapala tendría efectos similares a los mencionados en el escenario 1 con 0.5 cm de espesor.

0.1 cm

De 0.1 a 0.5 cm de ceniza puede depositarse entre 160 y 390 km. Los efectos socioeconómicos sobre la Sierra Huichol serían mínimos debido a la baja densidad de población. Sin embargo, la gran cantidad de aeropistas particulares pueden verse afectadas por la ceniza sobre la atmósfera (Tabla 4).

0.01 cm

De 0.01 a 0.1 cm de ceniza puede caer entre 390 y 725 kms. En esta zona más de 1 876 personas viven en Tepic, Fresnillo, Durango y Zacatecas. La ceniza fina puede causar efectos similares al escenario 1 con 0.01 cm de ceniza (Tabla 4). En las dos refinerías de Tepic se pueden obstruir los filtros de aire por la depositación de ceniza fina. Las hidroeléctricas de Tepic y Durango podrían tener problemas en las turbinas por las partículas finas corrosivas, además aumentaría la contaminación atmosférica en esta área.

Las autopistas de Mazatlán que conectan con la Ciudad de México y el norte del país tendrían efectos mínimos porque la ceniza es transportada por el viento. Las estaciones de microondas en Tepic, Fresnillo, Durango y Zacatecas, tendrían interferencia. Los aeropuertos internacionales en Zacatecas (8 257 vuelos/año, INEGI, 2007) y Durango (15 676 vuelos/año, INEGI, 2007), así como el aeropuerto nacional en Tepic (10 837vuelos/año, INEGI, 2007) tendrían efectos similares a los del escenario 1 por la ceniza en la atmósfera.

Escenario 5

De junio a agosto, la mayor probabilidad al sector noroeste (Figura 29).

100 cm

Alrededor de 100 cm de lapilli y ceniza puede caer sobre los primeros 3 kms. Esta zona tendría efectos parecidos a los del escenario 1 con 100 cm de espesor. La acumulación del material piroclástico en los afluentes de la parte alta del volcán puede formar lahares y fluir pendiente abajo sobre el Río la Lumbre.

50cm

De 50 a 100 cm de lapilli y ceniza se puede esperar entre 3 y 11 km. Los efectos esperados son los mismos para los escenarios anteriores (Tabla 4).

15 cm

De 15 a 50 cm de ceniza podría afectar entre 11 y 38 km del cráter. Más de 9 150 habitantes (INEGI, 2005) viven esta área. Los efectos esperados para la población, el comercio, agricultura, ganadería e industria serían similares a los del escenario 1 para una caída tefra similar (Tabla 4). Las carreteras Guadalajara-Ciudad Guzmán, Guadalajara-San Gabriel podrían bloquearse temporalmente. Por otra parte, las estaciones de microondas que están al norte del Volcán de Colima y en San Gabriel tendrían interferencia. Los transformadores de la subestación de luz de San Gabriel se dañarían y ocasionaría la falta de energía eléctrica porvarios días. Zapotitlán de Vadillo tiene una pista de 1 800 mts para avionetas y sería quedaría bloqueada por la acumulación de ceniza.

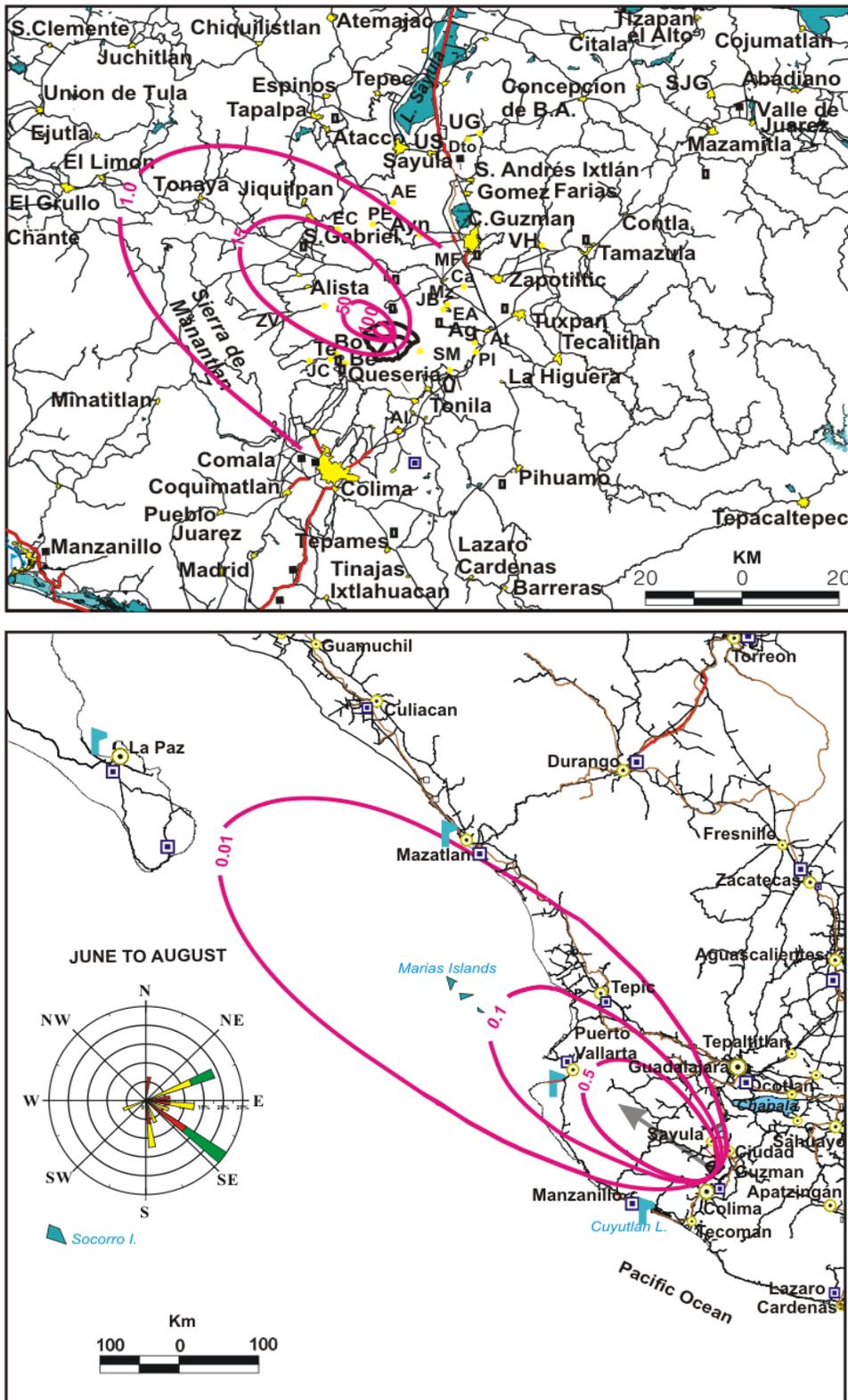


Figura 29. Escenario 5, si la erupción pliniana ocurre de junio a agosto puede afectar el lado noroeste.

> 1 cm

De 1 a 15 cms de ceniza puede caer entre 38 y 64 kms. Alrededor de 30 123 personas viven en esta área y tendrían los mismos problemas de salud mencionados en los escenarios anteriores con >1 cm de caída. Los ranchos El Borbollón, Schulte y El Jabalí áreas naturales protegidas privadas, la Hacienda San Antonio y el lago de La María área recreativa, dan empleo a gente local y tendrían daños en los manantiales, zonas de cultivo, ganado y viviendas. Por otro lado, el ciclismo de montaña y el campismo son actividades importantes durante los fines de semana alrededor de los volcanes de Colima y Nevado y podrían suspenderse por varios meses (Tabla 4). La fabrica de papel de Atenquique y la cementera de Zapotiltic tendrían efectos similares a los del escenario 1 (Tabla 4). La acumulación de material piroclástico en las barrancas La Lumbre, El Cordobán, Montegrande, La Arena y El Muerto puede desencadenar la formación de lahares en el verano por ser la época de lluvias.

La carretera San José del Carmen-Suchitlán puede quedar incomunicada al bloquearse los puentes de la Lumbre y el Zarco, mientras que las carreteras Manzanillo-Colima, Comala-San José del Carmen-Zapotitlán de Vadillo, Carrizalillos-Quesería tendrían falta de visibilidad y acumulación de ceniza. La subestación eléctrica de Zapotiltic abastece a más de 10 247 usuarios tendría cortocircuitos en líneas de distribución. Además, la estación de microondas en la Becerrera, puede tener problemas de transmisión por la interferencia.

0.5 cm

De 0.5 a 1.0 cm de ceniza puede depositarse entre 64 y 160 kms, donde hay más de 87 777 personas (INEGI, 2007). El impacto esperado en la agricultura y ganadería sería similar al escenario 1 con 0.5 cm de ceniza (Tabla 4).

Las carreteras Guadalajara-Manzanillo, Guadalajara-Barra de Navidad y El Grullo-Ciudad Guzmán por la poca visibilidad se tendrían problemas de tráfico. Las estaciones de radio y TV de El Grullo y Mazamitla tendrían interferencia. Las subestaciones de electricidad de Cuquío, El Grullo, Unión de Tula y Valle de Juárez podrían tener cortocircuitos y apagones.

Las Lagunas de Zapotlán y Sayula pueden tener una modificación en las condiciones de pH y de nutrientes por contaminación y sedimentación de ceniza.

0.1 cm

De 0.1 a 0.5 cm de ceniza se puede esperar entre 160 y 390 kms. Esta zona cuenta con 689 833 habitantes (INEGI, 2005) que viven en Tepic, área metropolitana de Puerto Vallarta y otras localidades. Puerto Vallarta es el tercer puerto más importante en México y recibe a más de cinco millones de turistas cada año. La economía de la zona depende del turismo (representan el 50% de toda la actividad económica en Puerto Vallarta) y de la industria manufacturera en Tepic. El turismo sería afectado durante el verano por horas o días si la erupción ocurre en esta época. También se pueden presentar problemas por las cenizas finas en los filtros de aire las refinerías de Tepic y Aguamilpa y en las turbinas de la central hidroeléctrica Jumatan; además, la ceniza circularía más tiempo en la atmósfera por la circulación anticiclónica que se desarrolla en estos meses y esto ocasionaría problemas de contaminación atmosférica en la zona.

Las carreteras del Pacífico, Guadalajara-Vallarta y Tepic-Mazatlán pueden tener problemas por la falta de visibilidad. Puerto Vallarta es la base para cruceros internacionales, embarcaciones particulares y locales. La caída de ceniza sobre el mar puede paralizar por horas o días el transporte marítimo. Las estaciones de microondas en Tepic y Puerto Vallarta tendrían interferencia en las señales de radio y TV. Las emisiones de ceniza pueden paralizar las actividades al aire libre durante horas o días. Los aeropuertos internacionales en Puerto Vallarta (38 892 vuelos/año, INEGI, 2007) y Tepic (10837 vuelos/año, INEGI, 2007). Los efectos esperados se citan en la Tabla 4 y serían similares a los del escenario 1 con el mismo espesor de caída.

0.01 cm

De 0.01 a 0.1 cms pueden depositarse entre 390 y 725 km. En esta zona, se encuentran más de 699 373 habitantes (INEGI, 2005) en el área metropolitana de Colima, Mazatlán, Islas Marías, además de pequeñas localidades. La población tendría efectos parecidos a los del escenario 1 (Tabla 4). Mazatlán es uno de los puertos más importantes de México, es el

principal medio de transporte para el comercio internacional y es el punto de enlace con el turismo de Estados Unidos y el puerto de La Paz. La ceniza podría dañar a la maquinaria de los barcos. Las estaciones de luz en Mazatlán y Colima, así como las carreteras de Colima-Manzanillo, Tepic-Nogales, pueden tener efectos mínimos. Los aeropuertos de Manzanillo (8 004 vuelos/año), Mazatlán (sin datos), Colima (5207 vuelos/año, INEGI, 2007) y el aeropuerto privado en Escuinapa, tendrían un impacto parecido a los del escenario 1 (Tabla 4).

Escenario 6

En septiembre, la dirección dominante del viento fue al oeste. En caso de presentarse una erupción en este mes es la dirección de mayor probabilidad de dispersión de piroclastos (Figura 30).

100 cm

Alrededor de 100 cm de lapilli y ceniza puede llegar a 3 km y los efectos son los mismos que los del escenario 1 con el mismo espesor (Tabla 4). La depositación de la ceniza puede formar lahares sobre los afluentes que desembocan en el Río La Lumbre, El Zarco y Santa Cruz (Martin Del Pozzo et al., 1995).

50 cm

De 50 a 100 cm de lapilli y ceniza pueden depositarse entre 3 y 11 km y el impacto sobre el bosque y fauna sería parecido que en los escenarios anteriores con 50 cm de espesor. El impacto puede ser significativo para los ranchos El Jabalí, Shulte y El Borbollón que se encuentran sobre el suroeste del volcán porque quedarían prácticamente destruidos. Los cultivos de café, maíz, agave, frutales quedarían cubiertos por la ceniza.

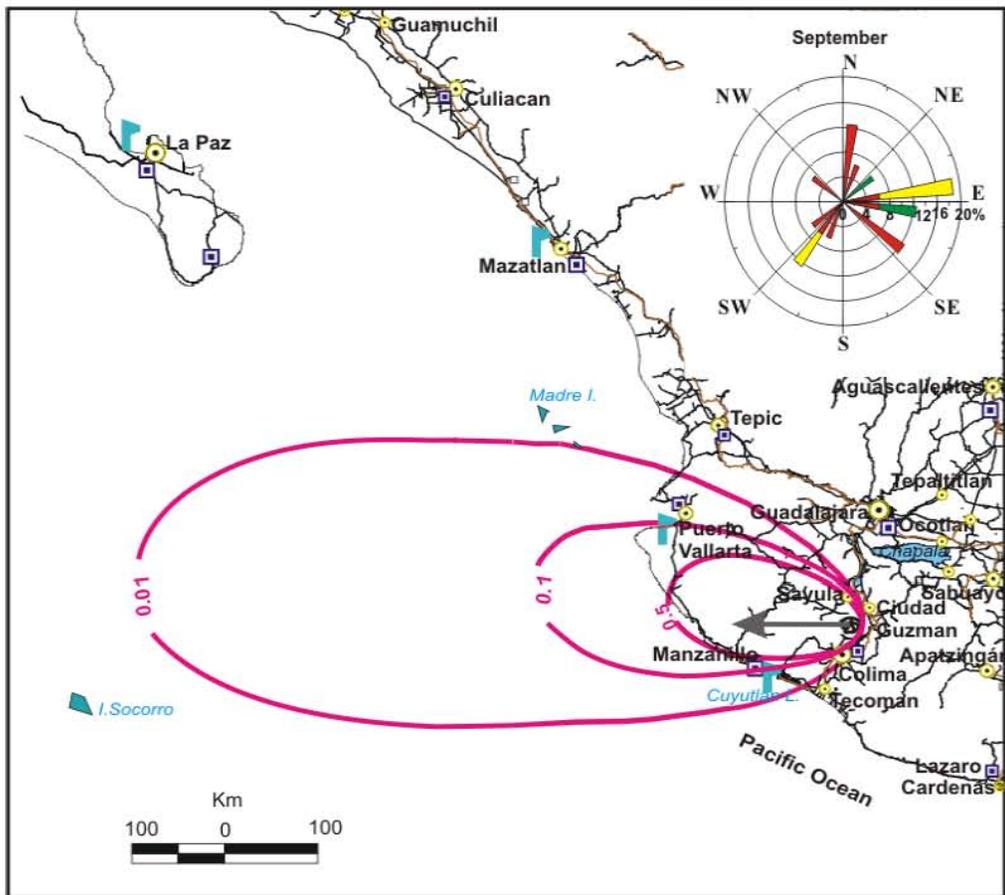
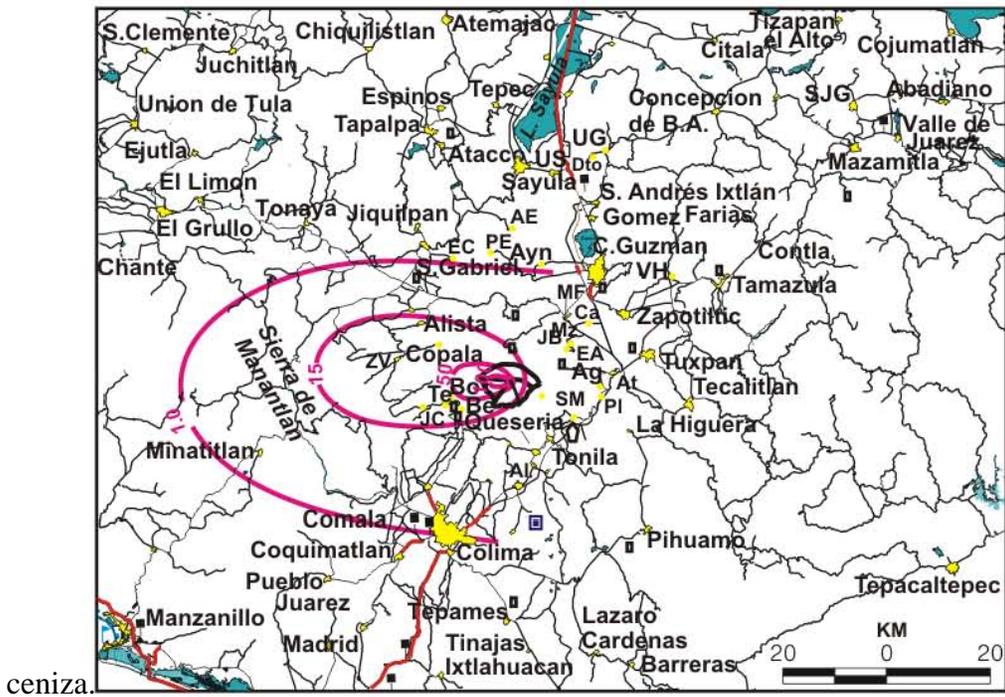


Figura 30. Escenario 6, si la erupción pliniana ocurre en septiembre puede afectar el lado oeste.

15 cm

De 15 a 50 cm de ceniza llegar a 38 km y más de 5 738 habitantes (INEGI, 2005), así como los cultivos y el ganado de esta área, tendrían efectos parecidos al del escenario 1 (Tabla 4).

La carretera Zapotitlán de Vadillo-Guadalajara tendría efectos similares a los del escenario 1. La estación de radio y TV en La Becerrera tendría cortocircuitos e interferencia. Las pistas de aterrizaje del rancho El Jabali y Zapotitlán Vadillo quedarían cubiertas de ceniza.

> 1 cm

De 1 a 14 cm de ceniza podría depositarse entre 38 y 64 km. Esta zona que tiene más de 319 840 habitantes. La población, los cultivos y el ganado experimentarían los mismos efectos que en el escenario 1 con > 1 cm de ceniza. La acumulación del material piroclástico puede obstruir la escorrentía y generar inundaciones sobre el Río Armería.

Las carreteras Zapotitlán de Vadillo-Colima, Colima-Vallarta-Puerto podrían cerrarse debido a la falta de visibilidad y la acumulación de ceniza. El suministro de electricidad a más de 54 939 usuarios (INEGI, 2007), podría verse interrumpido por apagones debido a cortocircuitos. La estación de microondas en San Gabriel tendría problemas de transmisión y el aeropuerto de Colima se vería obligado a cerrar operaciones por la ceniza en la atmósfera y hasta limpiar los aviones, pistas de aterrizaje y pistas de rodaje.

0.5 cm

De 0.5 a 0.1 cm de ceniza podría caer entre 64 y 160 km, donde hay más de 56 208 habitantes (INEGI, 2005). Los efectos para la población, cultivos (caña de azúcar, hortalizas y gramíneas forrajeras) y el ganado tendrían efectos similares a los del escenario 1 con el mismo espesor (Tabla 4).

Las carreteras de Guadalajara-Manzanillo, El Grullo-Ciudad Guzmán también se verían afectadas por la falta de visibilidad. Las centrales eléctricas y estaciones de radio y TV de microondas El Grullo y Mazamitla tendrían interferencia.

0.1 cm

De 0.1 a 0.5 cm ceniza puede caer entre 160 y 390 km. En esta área más de 125 235 personas (INEGI, 2005), que viven en la Armería, Manzanillo, Cuyutlán y pequeñas localidades pueden sufrir problemas similares ya mencionados en los escenarios anteriores con 0.1 cm de ceniza. En algunas zonas agrícolas los efectos serían mínimos. Las cenizas pueden afectar a la salinera de Cuyutlán.

La carretera Colima-Manzanillo puede tener problemas de tráfico debido a poca visibilidad causada por ceniza. El aeropuerto internacional de Manzanillo (8 004 vuelos/año, INEGI, 2007), podría suspender las operaciones durante horas o días. En esta zona también hay dos plantas termoeléctricas en Manzanillo y la ceniza podría aumentar la contaminación atmosférica en el área.

0.01 cm

De 0.1 a 0.01 cm de ceniza se esperaría entre 390 y 725 km del cráter y llegarían al área del Océano Pacífico. Más de 253 996 habitantes (INEGI, 2005), que viven en Puerto Vallarta, Tecmán, Sayula y pequeñas localidades tendrían un impacto parecido al escenario 1 con el mismo espesor. Las actividades turísticas y marítimas del área pueden verse afectadas por horas o días por la ceniza en la atmósfera y en el mar.

Las estaciones de microondas de Puerto Vallarta y Tecmán tendrían problemas mínimos al igual que las carreteras de la zona del Pacífico. El aeropuerto de Puerto Vallarta (38 892 vuelos/año, INEGI, 2007), tendría cancelaciones de vuelos y requerirían hacer operaciones de limpieza para los aviones y aeropistas.

Escenario 7

Durante noviembre y diciembre los vientos dominantes se desplazan ligeramente al oeste-suroeste. Los efectos esperados son muy parecidos a los del escenario 6, aunque la dispersión estaría más cargada hacia el sur, produciendo más caída en Colima y Tecmán que en septiembre (Figura 31).

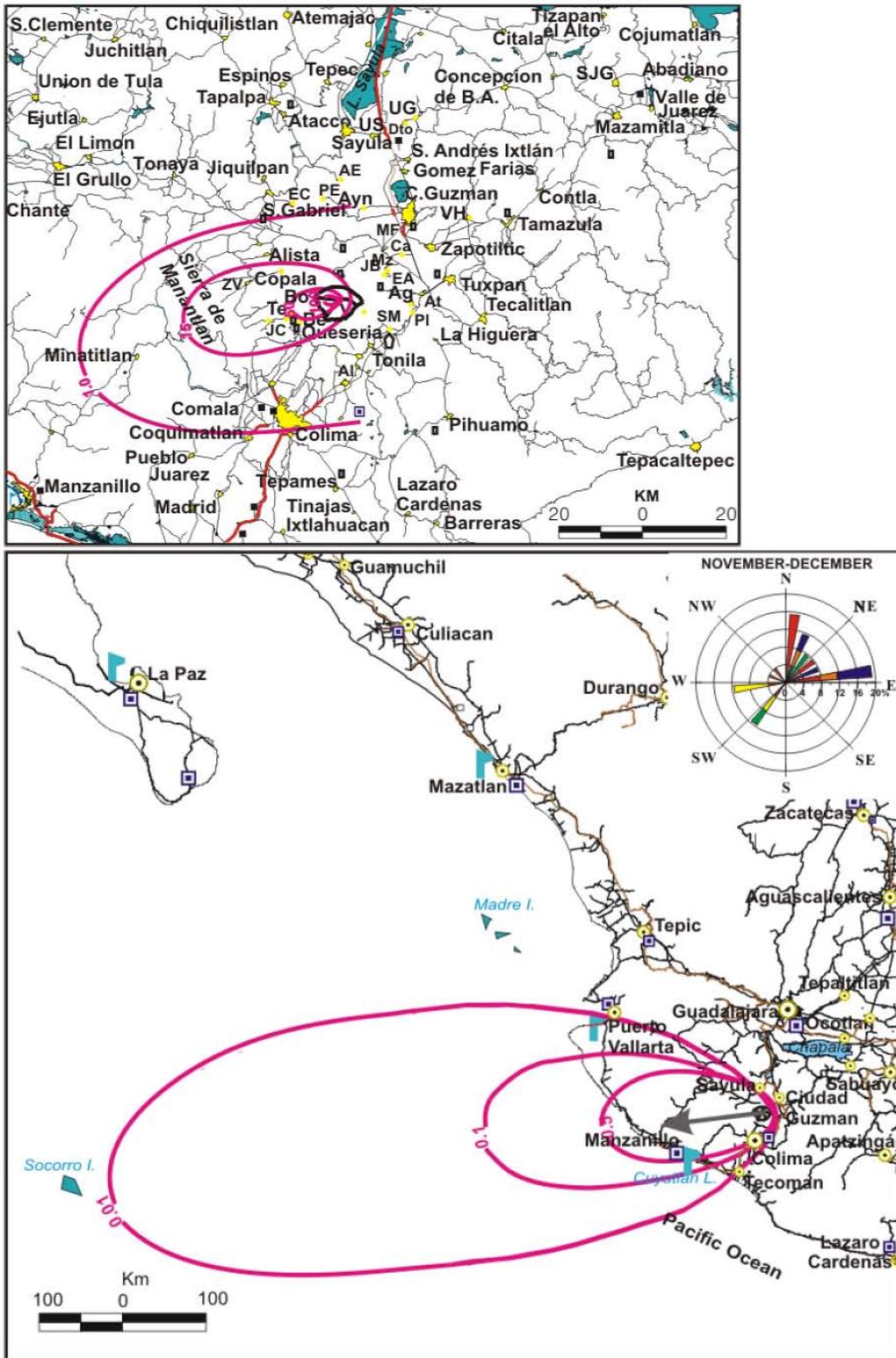


Figura 31. Escenario 7, si la erupción ocurre en noviembre o diciembre el área de afectación sería el oeste-suroeste.

6.3. Tiempo probable de transporte de ceniza

Fue posible estimar el tiempo de llegada de la ceniza a las principales ciudades con los resultados de dirección y velocidad del viento. Ciudad Guzmán podría esperar alrededor de 15 cm de ceniza producto de una erupción pliniana, si se presenta de enero a mayo o en octubre. La caída de ceniza podría comenzar en 10 minutos aproximadamente (Fonseca y Martin Del Pozzo, 2010). Si la erupción ocurre de enero a marzo ó en mayo, unos 0.5 cm de ceniza caerían en menos de una hora en Guadalajara, mientras que en León, 0.1 cm de ceniza comenzaría a caer dos horas después del inicio de la erupción. Si se produce el evento en abril ó en octubre, la ceniza caería en la Ciudad de México y en Puebla, 5 y 6 horas después de la erupción. Si se presenta la erupción de mayo a diciembre, las ciudades como Manzanillo, Puerto Vallarta y Mazatlán podrían esperar entre 0.1 y 0.01 cm de ceniza en 35 minutos, 2 y 4 horas después de la erupción respectivamente.

6.4. REFERENCIAS

- Arreola, J. M. (1915). Catálogo de las erupciones antiguas del Volcán de Colima. Memorias de la Sociedad Antonio Alzate. 32:443-481
- Casadevall, T. J. (1994). The 1989-1990 eruption of Redoubt Volcano, Alaska: Impacts on Aircraft operations. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 62:301-316
- Cook, R. J., Barron, J. C., Papendick, R. I. y Williams, G. J. (1981). Impact on Agriculture of the Mount St. Helens Eruptions *Science* 211:4477:16 - 22 DOI: 10.1126/science.211.4477.16
- Fonseca, R., Martin, Del Pozzo A. L., Perez, I., Garcia, M. (2007). Ash fall impact from Colima Volcano during may and June 2005. *El Chichon volcano: twenty-five years later. A commemorative conference.* Edited by Espindola, J.M., Arce, J. L and Macias J. L. Universidad Nacional de México, IAVCEI, 31
- Fonseca, R., y Martin Del Pozzo, A. L. (2010). Ash-fall hazard from a Plinian Eruption at Colima Volcano, Mexico. *Annals of Geophysics.* 53, 5-6, 51-81. doi: 10.4401/ag-4872
- Horwell, C., y Baxter, P. (2006). The respiratory health hazards of volcanic ash: a review for volcanic risk mitigation. *Bulletin of Volcanology* 69:1-24. DOI 10.1007/s00445-006-0052-y
- INEGI., Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, (2005). II Censo de población y vivienda. Resultados Definitivos, tabulados básicos por estado:
<http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/espanol/sistemas/conteo2005/>
- INEGI., Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, (2007). Anuario estadístico por estado. <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/espanol/sistemas/Aee07/estatal/col/index.htm>

- Lopez Vilchis, P., Gaona, S. López, O. G. (1990). Mamíferos terrestres de importancia cinegética, 1:8000 000. Atlas Nacional de México. Instituto de Geografía, UNAM. 2:8-9
- McKnight, D. M., Feder, G. I., Stiles, A. (1982). Effects on a blue-green alga of leachates of ash from the May 18 eruption. In Lipman PW, Milleneaux DR (ed)The 1980 eruptions of Mount St. Helens, Washington, Geological Survey Professional Paper, 733-741
- Nieto, A., Martin Del Pozzo, A.L., Fonseca, R y Garcia M. (2007). Effect of the ash Fall on the Human Health at Colima Volcano During 2005-2006. 2007 Joint Assembly AGU V41A-05
- Schuster, R. (1982). Effects of the eruptions on civil works and operation in the pacific northwest In Lipman, PW., Milleneaux, DR. (ed). The 1980 eruptions of Mount St. Helens, Washington, Geological Survey Professional Paper, 701-718
- Waitz, P. (1932). Datos históricos y bibliográficos acerca del Volcán de Colima. Memoria de la Sociedad Antonio Alzate 53:349-384

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES

Los resultados del análisis del campo de viento horizontal se obtuvieron adaptando un modelo cinemático con los radiosondeos de la base Global Gridded Upper Air Statistic (1980-1995) para 15 niveles atmosféricos y se complementaron con el análisis vertical de Manzanillo. Arriba de los 23 000 msnm los vientos van hacia el este o noreste de diciembre a marzo, sin embargo la circulación local muestra un cambio al oeste en noviembre y diciembre por circulaciones anticiclónicas que se forman sobre el Pacífico y la Península de Yucatán. Los vientos del oeste o noroeste dominan de abril a octubre y la circulación local muestra que pueden desplazarse hacia el este en abril y octubre por la presencia de una circulación anticiclónica.

Se proponen 7 escenarios para caída de ceniza por un evento pliniano mayor a 23 km de altura, de acuerdo con la componente diaria mensual del viento vertical local (17 000 a 28 000 msnm) y campo de viento horizontal bajo condiciones estables atmosféricas.

El escenario 1 se presentaría de enero a marzo y alrededor de 100 cm de pómez, lapilli o ceniza, podrían depositarse en los primeros 3 km al noreste del volcán. El bosque de coníferas y pastizal alpino del Parque Nacional Nevado de Colima puede quedar cubierto o calcinado por los balísticos. La fauna, como insectos, reptiles, aves y pequeños mamíferos se morirían por asfixia, deshidratación o sepultamiento. Estos efectos se presentarían en los 7 escenarios porque el bosque de coníferas y la fauna local se distribuyen a más de 3 km de diámetro del volcán. El equipo de monitoreo sísmico y visual que está a 5.3 km al noreste del volcán y el sistema de las alarmas para lahares de Juan Barragán pueden ser destruidos por más de 50 cm de ceniza. La Laguna de Zapotlán se contaminaría al caer más de 15 cm de ceniza, se modificaría el pH del agua y los peces morirían. Más de 100 mil habitantes tendrían problemas oculares, de piel, respiratorios y crisis nerviosas al caer alrededor de 15 cm de ceniza. En Ciudad Guzmán, Atenquique y Zapotiltic se pueden colapsar los techos por el peso de la ceniza. También los cultivos de caña de azúcar, agave, hortalizas, granos (maíz, sorgo), leguminosas, árboles frutales (guayaba, durazno, manzana, limón) en etapa de floración o cultivos en etapas de crecimiento quedarían sepultados o dañados. El ganado

puede morir al ingerir el forraje o agua contaminada por la ceniza. Los transformadores y el cableado de las estaciones eléctricas de Ciudad Guzmán, Tamazula y San Gabriel pueden dañarse por la caída de ceniza, interrumpiendo el suministro de energía eléctrica. Las terracerías de Juan Barragán, Ejido Atenquique y la carretera Colima-Guadalajara quedarían bloqueadas. La falta de visibilidad y daños a los filtros de aire, aceite y combustible de los vehículos limitaría el tránsito. El aeropuerto internacional de Guadalajara puede tener más de 0.5 cm de ceniza y a los aeropuertos de León, Aguascalientes, San Luis Potosí, Ciudad Victoria y Celaya les puede caer más de 0.01 cm. La ceniza ocasionaría cancelación de vuelos por horas o días, desviación de rutas aéreas, interferencia en las transmisiones, limpieza de pistas y aviones e indemnización de pasajeros. Las refinerías de Salamanca y San Luis Potosí pueden tener alrededor de 0.1 cm de ceniza, los filtros de las chimeneas podrían obstruirse por partículas finas y aumentaría la contaminación atmosférica en estas dos ciudades.

El escenario 2 muestra que en abril o en octubre se afectaría el lado este. En los primeros 3 km se puede esperar más de 100 cm de pómez, lapilli y ceniza, lo que ocasionaría sepultamiento de la vegetación y muerte en la fauna local, un efecto similar se presentaría a 11 km por la caída de 50 cm de espesor. Más de 20 mil personas serían afectadas por 15 cm de ceniza y estarían expuestas a problemas oculares, de piel y respiratorios. La fábrica de papel de Atenquique tendría alrededor de 15 cm de ceniza y se dañarían los filtros de las chimeneas, maquinaria y materia prima expuesta al aire libre. También el ingenio de Quesería tendría daños en sus filtros y chimeneas por más de 1 cm de ceniza. La acumulación de las cenizas en los afluentes del río Tuxpan podría generar inundaciones. Las carreteras (Guadalajara-Manzanillo) y líneas de ferrocarril quedarían bloqueadas. El aeropuerto de Colima cancelaría sus vuelos por horas o días, desviaría sus rutas y tendría cancelaciones de vuelos al tener más de 1 cm de ceniza, los aeropuertos de Zamora y Uruapan serían afectados por más de 0.5 cm y el de Morelia por 0.1 cm. Los aeropuertos de la Ciudad de México, Puebla, Querétaro, Toluca, Cuernavaca, Celaya y Pachuca tendrían más de 0.01 cm y la ceniza en la atmósfera ocasionaría cancelación de vuelos, desviación de sus rutas aéreas y habría interferencia en las transmisiones de microondas, radio y TV.

En mayo se pueden presentar dos escenarios: nornoreste y nornoroeste. El escenario 3 muestra que en mayo la ceniza se dispersaría al nornoreste del volcán. Alrededor de 100 cm de pómez, lapilli o ceniza se depositarían en un radio de 3 km. El efecto sería similar a 11 km por caída de 50 cm de pómez, lapilli y ceniza; el bosque de coníferas y pastizal quedaría cubierto o calcinado. La fauna moriría por asfixia, deshidratación o sepultamiento. El equipo de monitoreo sísmico y visual, así como la estación de microondas de radio y TV ubicada al norte del volcán quedarían destruidas. Más de 120 mil personas tendrían problemas oculares, de piel, respiratorios y estrés al caer alrededor 15 cm de ceniza; la fábrica de Zapotitlic se dañaría por la obstrucción de las chimeneas, la maquinaria y materia prima se dañarían por abrasión. También las alarmas para lahares de Juan Barragán y Atenquique se dañarían y si las lluvias comienzan en mayo la zona estaría sujeta a lahares. Más de un 1 cm de ceniza afectaría al ingenio de Quesería y a la fábrica de papel de Atenquique. Las principales carreteras Guadalajara-Ciudad Guzmán-Colima y las terracerías quedarían obstruidas y podrían cerrarse debido a la falta de visibilidad y acumulación de ceniza. El aeropuerto de Guadalajara tendría que cancelar los vuelos y desviar sus rutas aéreas, además habría interferencia en las transmisiones por más de 0.5 cm de ceniza, el aeropuerto de Aguascalientes tendría 0.1 cm y el de León, San Luis Potosí, Zacatecas y Zamora más de 0.01 cm. El lago de Chapala sería afectado por más de 0.5 cm de ceniza.

El escenario 4 también se puede presentar en mayo hacia el nornoroeste. Alrededor de 100 cm de pómez, lapilli o ceniza se depositarían 3 km al nornoroeste del volcán. El bosque de coníferas y pastizal quedaría cubierto o calcinado por balísticos. La fauna moriría por asfixia, deshidratación o sepultamiento. La estación de microondas ubicada al norte del volcán y el equipo de monitoreo sísmico y visual serían destruidas por más de 50 cm de ceniza. La acumulación de material sobre los afluentes de La Lumbre podría formar lahares si se presentan las lluvias en mayo. Más de 4 210 habitantes tendrían problemas similares a los escenarios anteriores (oculares, de piel, respiratorios y estrés) al caer más de 15 cm de ceniza. También se afectarían los transformadores de la subestación eléctrica de San Gabriel y la estación de microondas, interrumpiéndose el suministro de energía y las telecomunicaciones. La carretera Guadalajara-San Gabriel quedaría bloqueada por la

ceniza. La fábrica de Zapoltitic tendría más de 1 cm de ceniza y se afectarían las chimeneas, la maquinaria y material que se encuentra al aire libre. El aeropuerto de Guadalajara cancelaría sus vuelos y desviaría sus rutas aéreas por horas o días al caer alrededor de 0.5 cm de ceniza, las aeropistas que se encuentran en la Sierra Huichol y los aeropuertos de Zacatecas, Durango y Tepic tendrían entre 0.1 y 0.01 cm. Las lagunas de Zapotlán y Sayula tendrían una variación en el pH y nutrientes por la ceniza y se morirían los peces y plantas nativas.

El escenario 5 se presentaría de junio a agosto y afectaría principalmente el sector noroeste. Más de 100 cm de pómez, lapilli o ceniza se acumularían en los primeros 3 km y el bosque de coníferas y pastizal alpino quedaría cubierto o calcinado por los balísticos. La fauna moriría por asfixia, deshidratación o sepultamiento. Más de 9 150 habitantes serían afectados por 15 cm de ceniza; la pista de Zapotitlán de Vadillo con 1 800 m quedaría inhabilitada por la acumulación de ceniza; Las carreteras Guadalajara-Ciudad Guzmán y Guadalajara-San Gabriel quedarían bloqueadas temporalmente. Los ranchos El Borbollón, Shulte y El Jabalí, la Hacienda San Antonio y centro recreativo La María tendrían más de 1 cm de ceniza. El material depositado en los ríos La Lumbre y El Zarco podrían formar lahares en la época de lluvias al igual que en Atenquique. Las fábricas de Atenquique y Zapotiltic tendrían problemas en los filtros de las chimeneas; los transformadores de la subestación de Zapotiltic y la estación de microondas de la Becerrera tendrían cortocircuitos y problemas de transmisión en las estaciones de microondas y radio. Las lagunas de Zapotlán y Sayula pueden ser contaminadas al caer alrededor de 0.5 cm de ceniza; las estaciones de el Grullo y Mazamitla tendrían daños en los transformadores. La actividad turística de Puerto Vallarta sería afectada durante el verano por horas o días al tener más de 0.1 cm de ceniza. Los filtros de las chimeneas de las refinerías de Tepic y Aguamilpa y las turbinas de la hidroeléctrica de Jumatán podrían dañarse al tener alrededor de 0.1 cm de ceniza. Los aeropuertos de Puerto Vallarta y Tepic tendrían cancelaciones de vuelos, desviación de rutas aéreas. Los aeropuertos de Manzanillo, Mazatlán, Colima y Escuinapa podrían tener 0.01 cm, se verían afectados porque la ceniza podría permanecer más tiempo en la atmósfera debido a la circulación anticiclónica que se forma en estos meses, afectando también a la actividad turística del puerto de Mazatlán.

El escenario 6 correspondiente a septiembre, muestra que alrededor de 100 cm de pómez, lapilli o ceniza podrían depositarse en los primeros 3 km al oeste del volcán. El bosque de coníferas y pastizal quedaría cubierto o calcinado. La fauna morirían por asfixia, deshidratación o sepultamiento. Los ranchos El Jabalí, Shulte -El Borbollón-, se dañarían por más de 50 cm de ceniza. Las pistas aéreas de Zapotitlán de Vadillo y de El Jabalí se cubrirían por 15 cm, y la carretera Zapotitlán de Vadillo-Guadalajara quedaría bloqueada por la acumulación y falta de visibilidad. La acumulación de las cenizas podría obstruir la escorrentía de los afluentes y generar inundaciones sobre el Río Armería. La subestación de San Gabriel y estación de microondas quedarían dañadas por más de 1 cm y tendrían problemas de transmisión. La salinera de Cuyutlán y las dos termoeléctricas de Manzanillo podrían esperar alrededor de 0.1 cm; el aeropuerto de Colima cancelaría los vuelos y desviaría sus rutas aéreas debido a la ceniza en la atmósfera. El aeropuerto de Manzanillo podría tener más de 0.1 cm de ceniza y los aeropuertos de Puerto Vallarta, Tecomán y Sayula podrían tener más de 0.01 cm de ceniza y tendrían efectos similares. Las actividades turísticas y marítimas de Manzanillo y Puerto Vallarta serían afectados por horas o días debido a la ceniza. Las partículas finas podrían permanecer más tiempo en la atmósfera por la circulación anticiclónica que se forma en este mes. El escenario 7 se puede dar en noviembre-diciembre y tendría efectos similares al escenario 6, pero con una ligera desviación hacia el sur y la ciudad de Colima y Tecomán tendrían mayor caída de ceniza.

Si la erupción ocurre de enero a mayo, Ciudad Guzmán podría esperar alrededor de 15 cm de ceniza 10 minutos después de la erupción; si ocurre de enero a marzo o en mayo, Guadalajara tendría alrededor de 0.5 cm en menos de una hora y León 0.1 cm en dos horas. La Ciudad de México y Puebla tendrían caída de ceniza en 5 y 6 horas después de la erupción si ocurre en abril o en octubre. Manzanillo, Puerto Vallarta y Mazatlán podrían tener 0.01 cm a más de 0.1 cm de ceniza en 35 minutos, 2 y 5 horas si la erupción ocurre de mayo a septiembre o noviembre-diciembre, periodos de importante actividad turística.

La situación actual del Volcán de Colima es similar a los precursores de 1818 y 1913, porque se presentan erupciones efusivas intercaladas con fases vulcanianas intermitentes que aumentan en explosividad cuando se acerca el final del ciclo y anteceden al crecimiento

del domo central, baja actividad, emisiones de gas, ruidos y derrumbes que culminan con la erupción que finaliza el ciclo.

Los escenarios para un evento pliniano corresponden a condiciones atmosféricas estables y la a presencia de un fenómeno atmosférico extraordinario podría ocasionar variaciones en la dirección e intensidad del viento. Si la altura de la columna fuera mayor a 23 km, la dispersión de la ceniza sería similar a los escenarios propuestos, sin embargo, una columna de menor altura podría tener una dispersión distinta.

El modelo atmosférico puede adaptarse para ingresar parámetros vulcanológicos como granulometría, altura de la columna y registros de viento cada hora para pronosticar la trayectoria de la ceniza en una escala de tiempo de horas.

Se estimaron los efectos para la población, actividades económicas e infraestructura, sin embargo, estos resultados requieren ser actualizados a corto plazo debido a la dinámica poblacional y actividades económicas.

APÉNDICE

Impacto de la caída de ceniza del Volcán de Colima

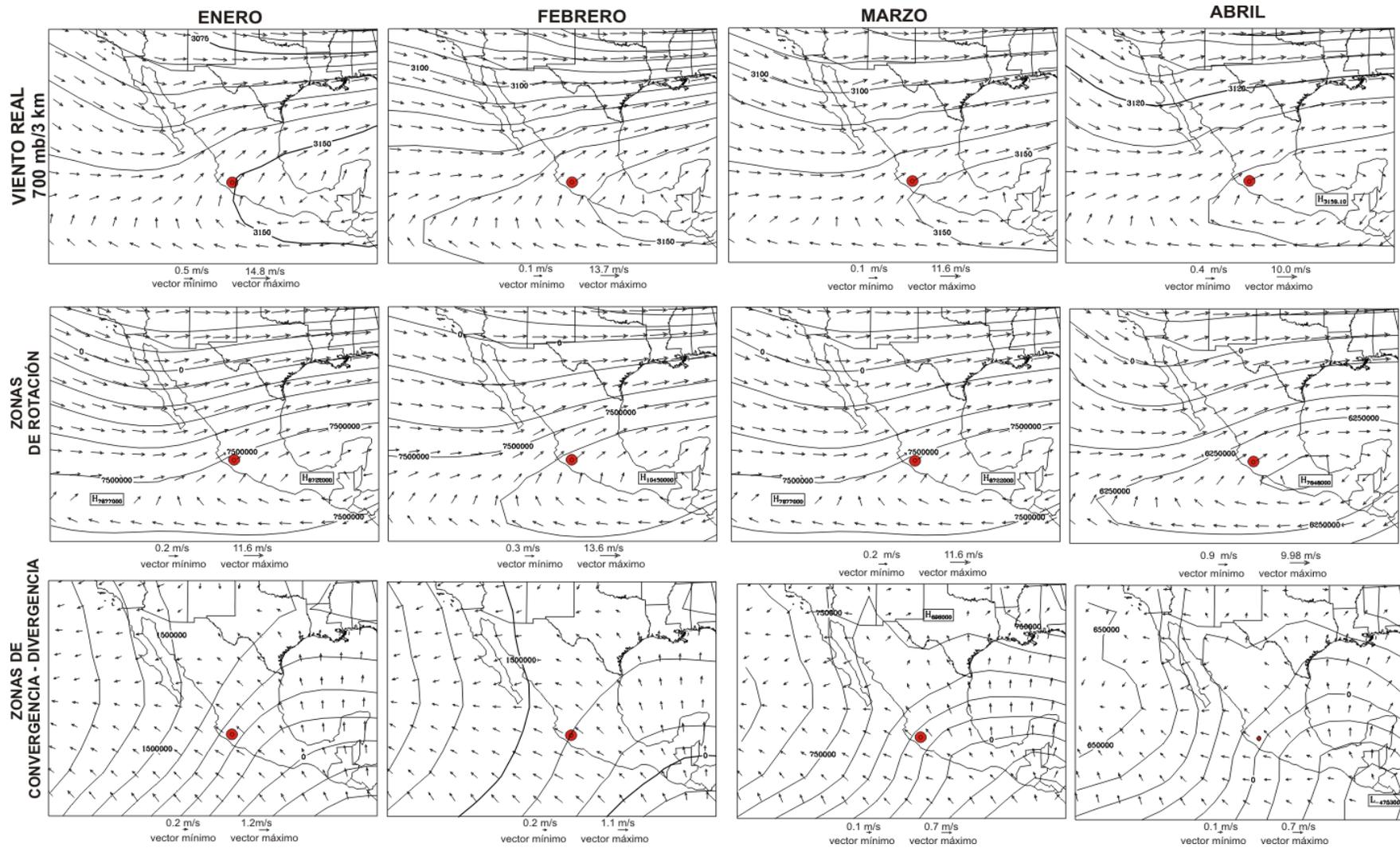


Figura 1. GRUPO I. Campo de viento horizontal a 700 mb. Volcán de Colima (punto). El viento observado o viento real corresponde a la primera fila de mapas. La segunda fila muestra el viento rotacional o viento no divergente u_{ψ} y los contornos son de la función corriente ψ , y la tercera línea corresponde al viento divergente v_{χ} y los contornos corresponden a la función potencial. De enero a abril se observan vientos del SW y una circulación anticiclónica en el centro de México incluyendo al Volcán de Colima (VC).

Impacto de la caída de ceniza del Volcán de Colima

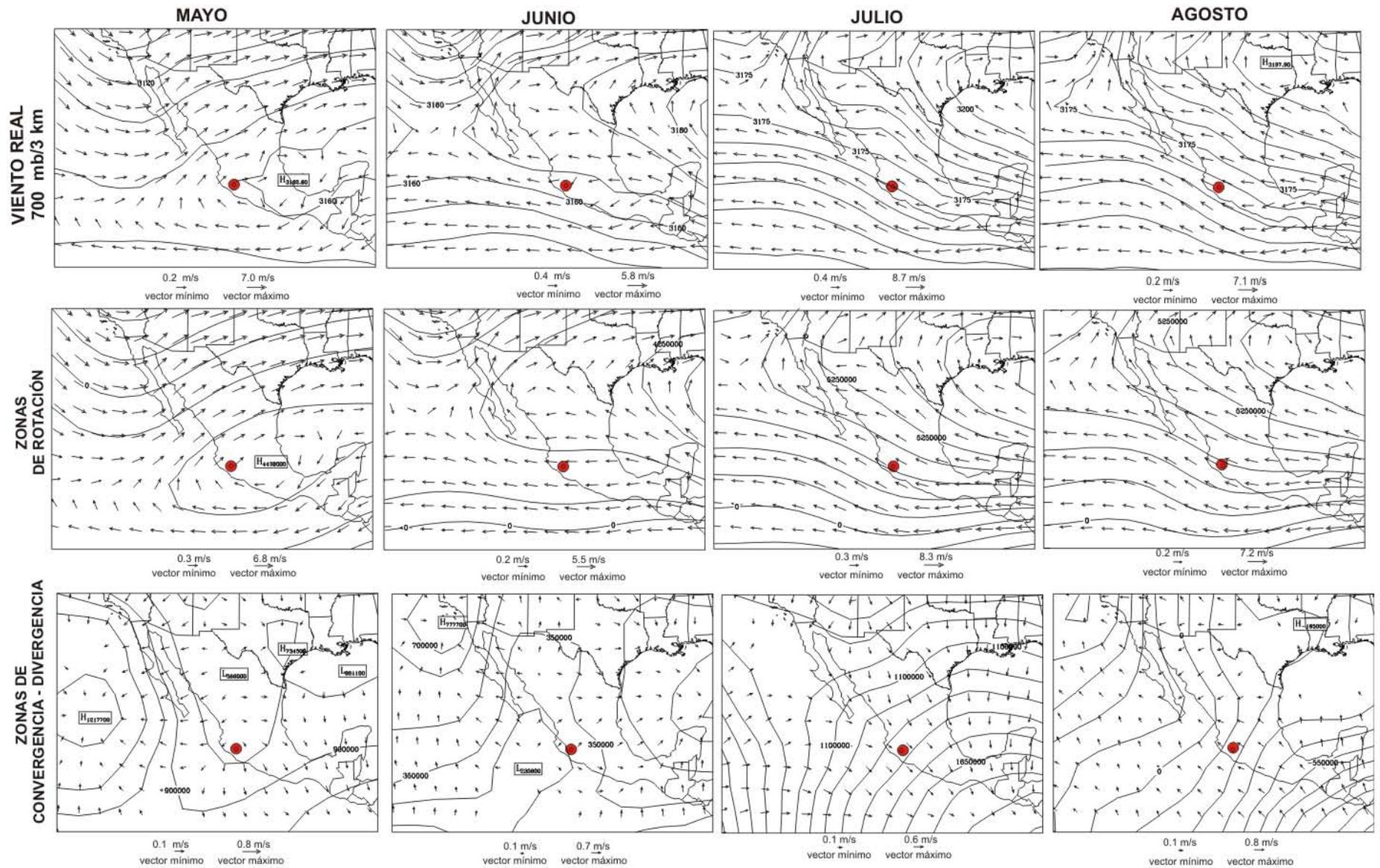


Figura 2. GRUPO I. Campo de viento horizontal a 700 mb. En el VC se observan vientos del SW en mayo y una circulación anticiclónica divergente, mientras que de junio a agosto predominan los vientos del sureste.

Impacto de la caída de ceniza del Volcán de Colima

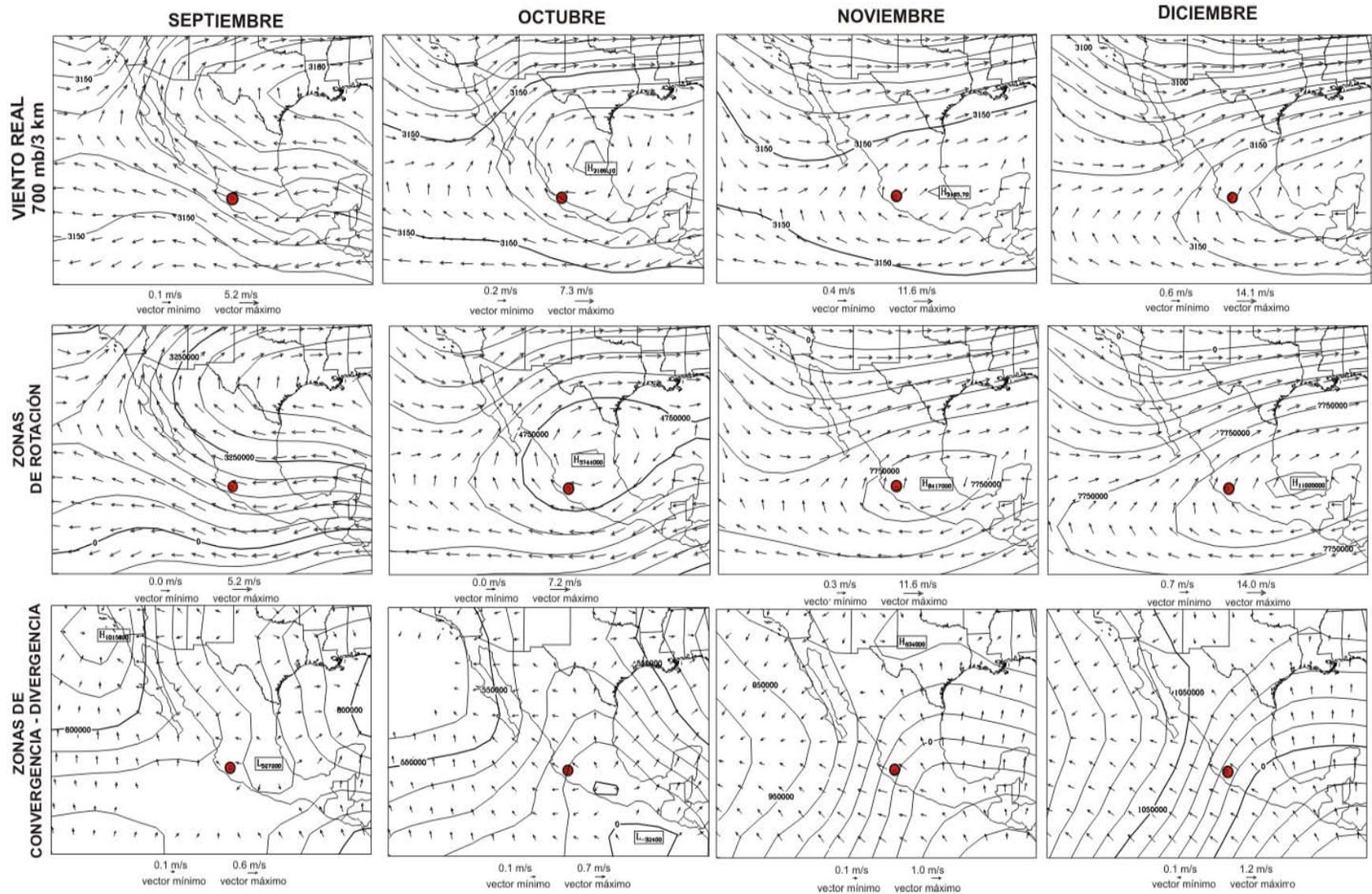


Figura 3. GRUPO I. Campo de viento horizontal a 700 mb. De septiembre a diciembre se presentan vientos del E en septiembre y circulaciones anticiclónicas divergentes en octubre, noviembre y diciembre. Se identifican vientos convergentes al noroeste de México en septiembre y octubre.

Impacto de la caída de ceniza del Volcán de Colima

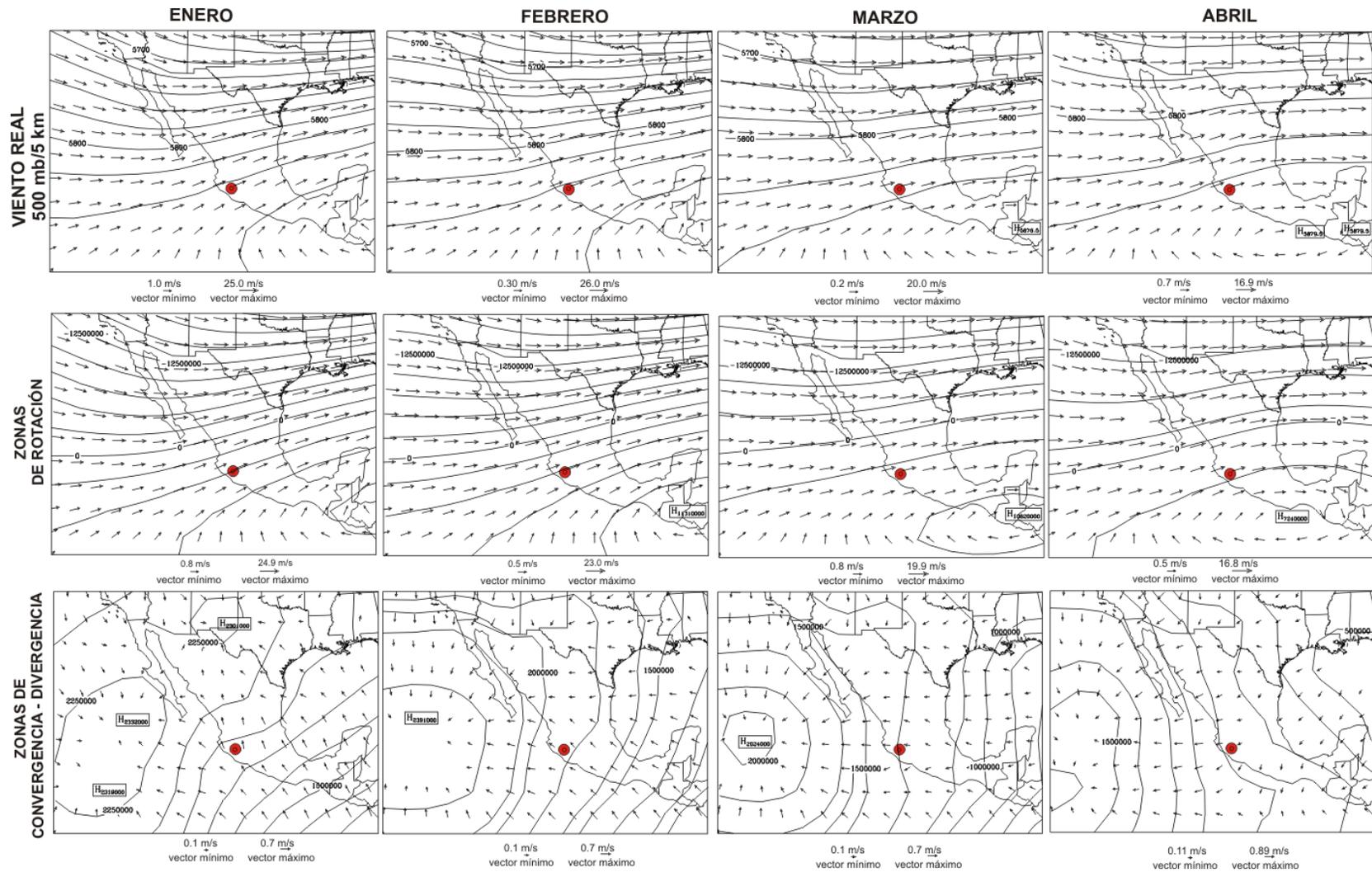


Figura 4. GRUPO I. Campo de viento horizontal a 500 mb. De enero a abril se observan vientos del SW. Se presenta una circulación anticiclónica en febrero, marzo y abril en sureste de México

Impacto de la caída de ceniza del Volcán de Colima

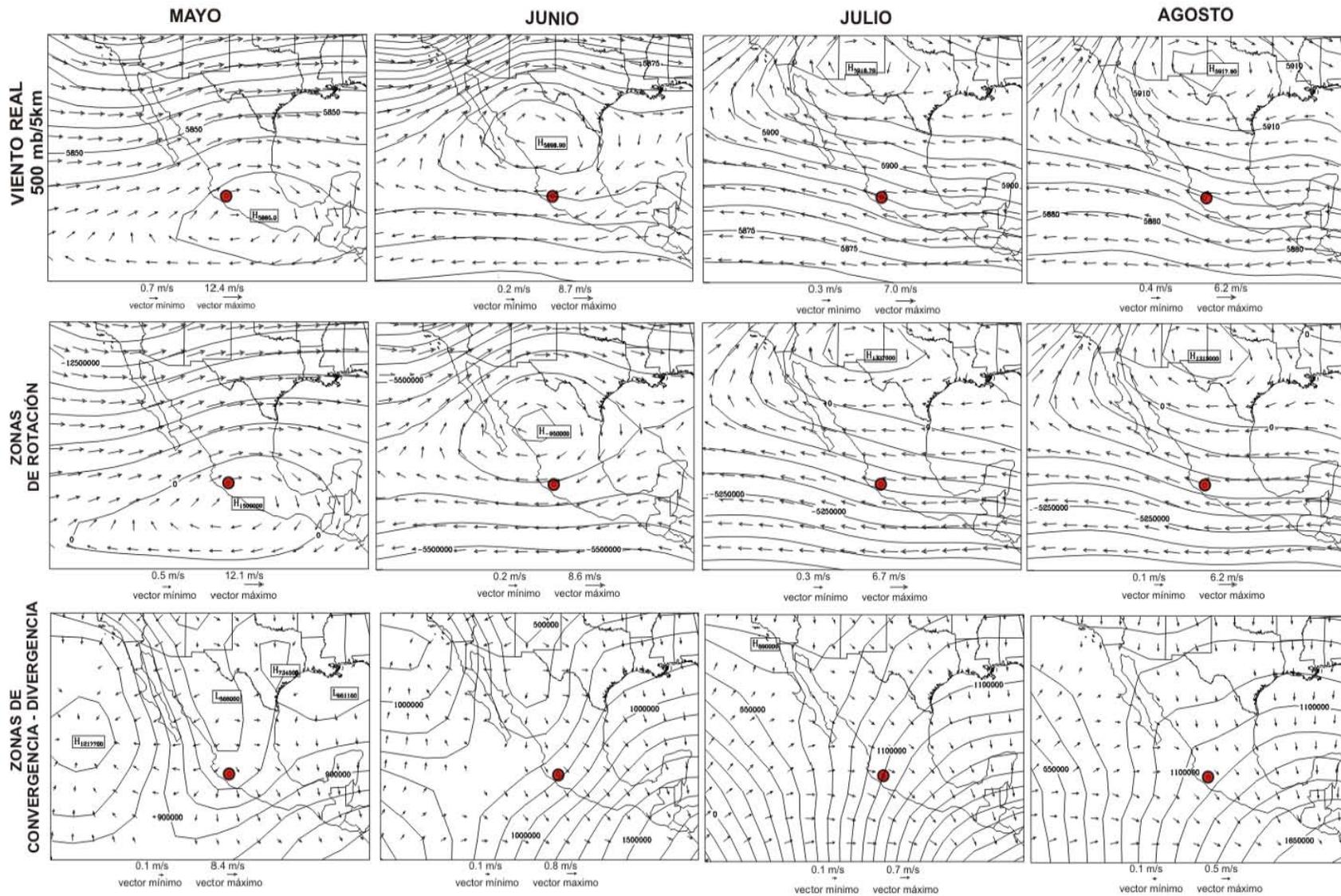


Figura 5. GRUPO I. Campo de viento horizontal a 500 mb. En mayo son recurrentes los vientos del suroeste con una circulación anticiclónica divergente en la zona del VC. Los vientos del sureste y este dominan entre mayo y agosto y se observa una circulación anticiclónica que afecta a la zona del VC en junio.

Impacto de la caída de ceniza del Volcán de Colima

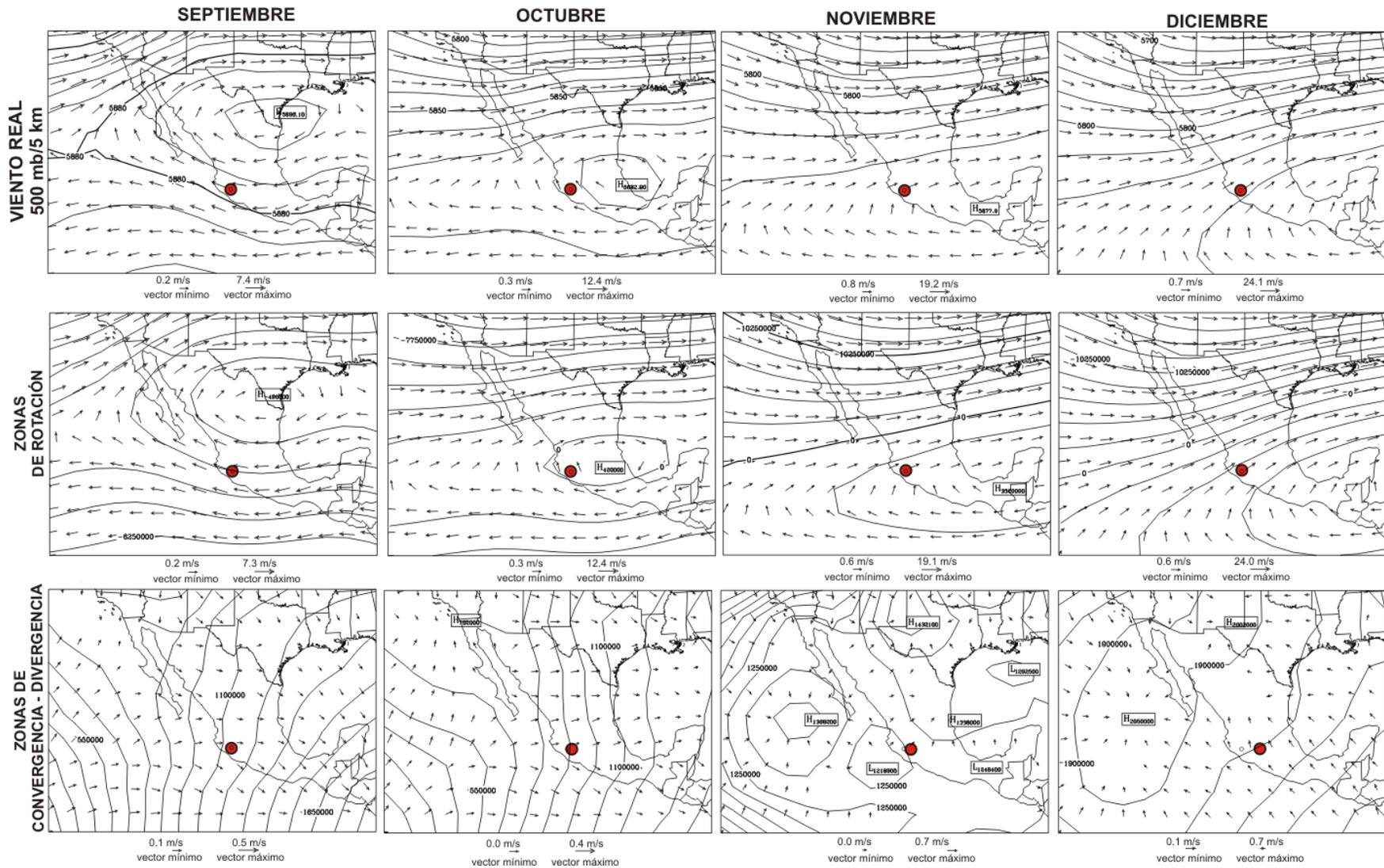


Figura 6. GRUPO I. Campo de viento horizontal a 500 mb. Los vientos dominantes del este y sureste se presentan en septiembre y octubre, así como una circulación anticiclónica en la zona del VC. También se presentan vientos del suroeste en noviembre y diciembre.

Impacto de la caída de ceniza del Volcán de Colima

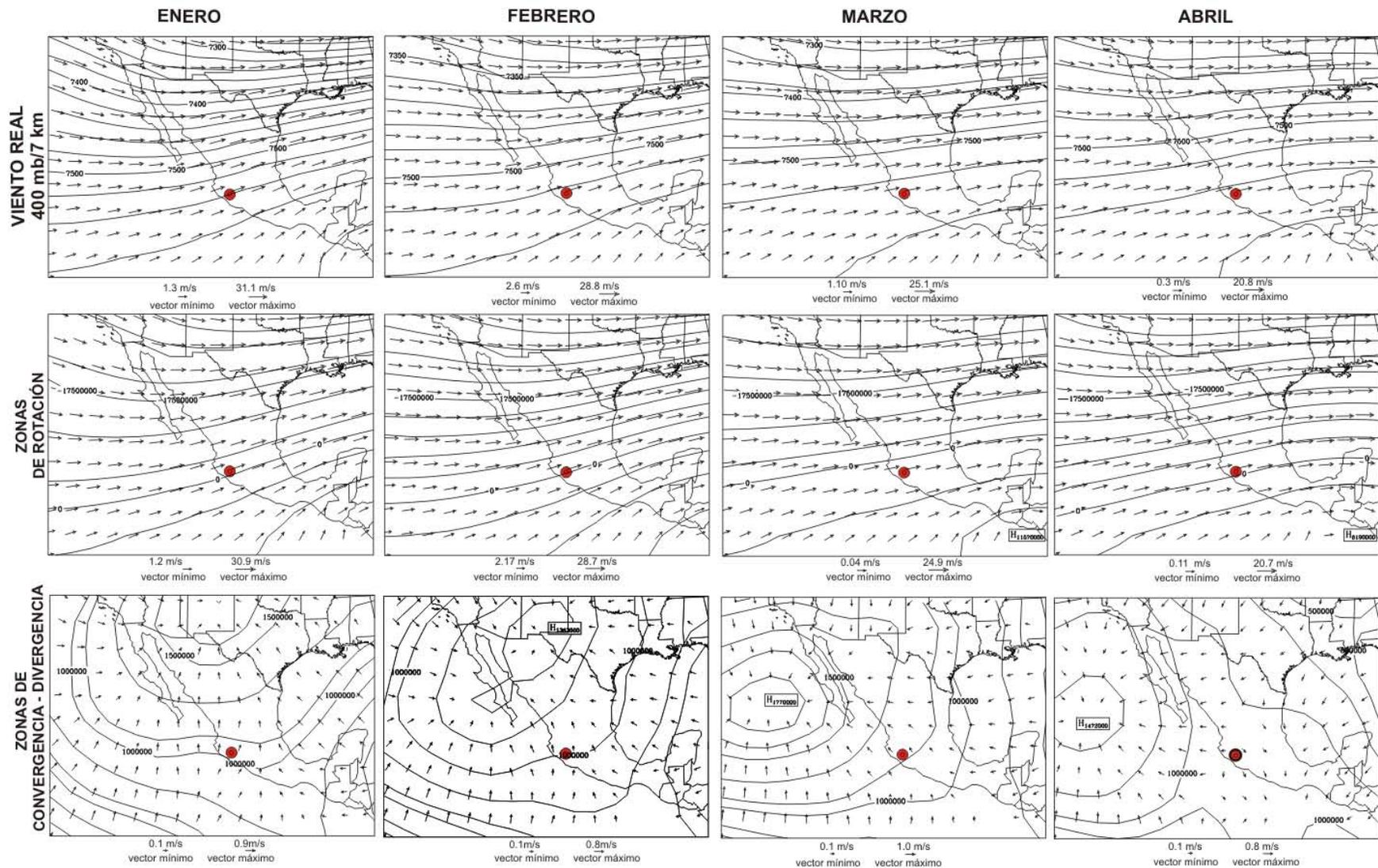


Figura 7. GRUPO II. Campo de viento horizontal 400 mb. En el VC de enero a abril se observan vientos del oeste. También se identifican vientos convergentes sobre el noroeste de México.

Impacto de la caída de ceniza del Volcán de Colima

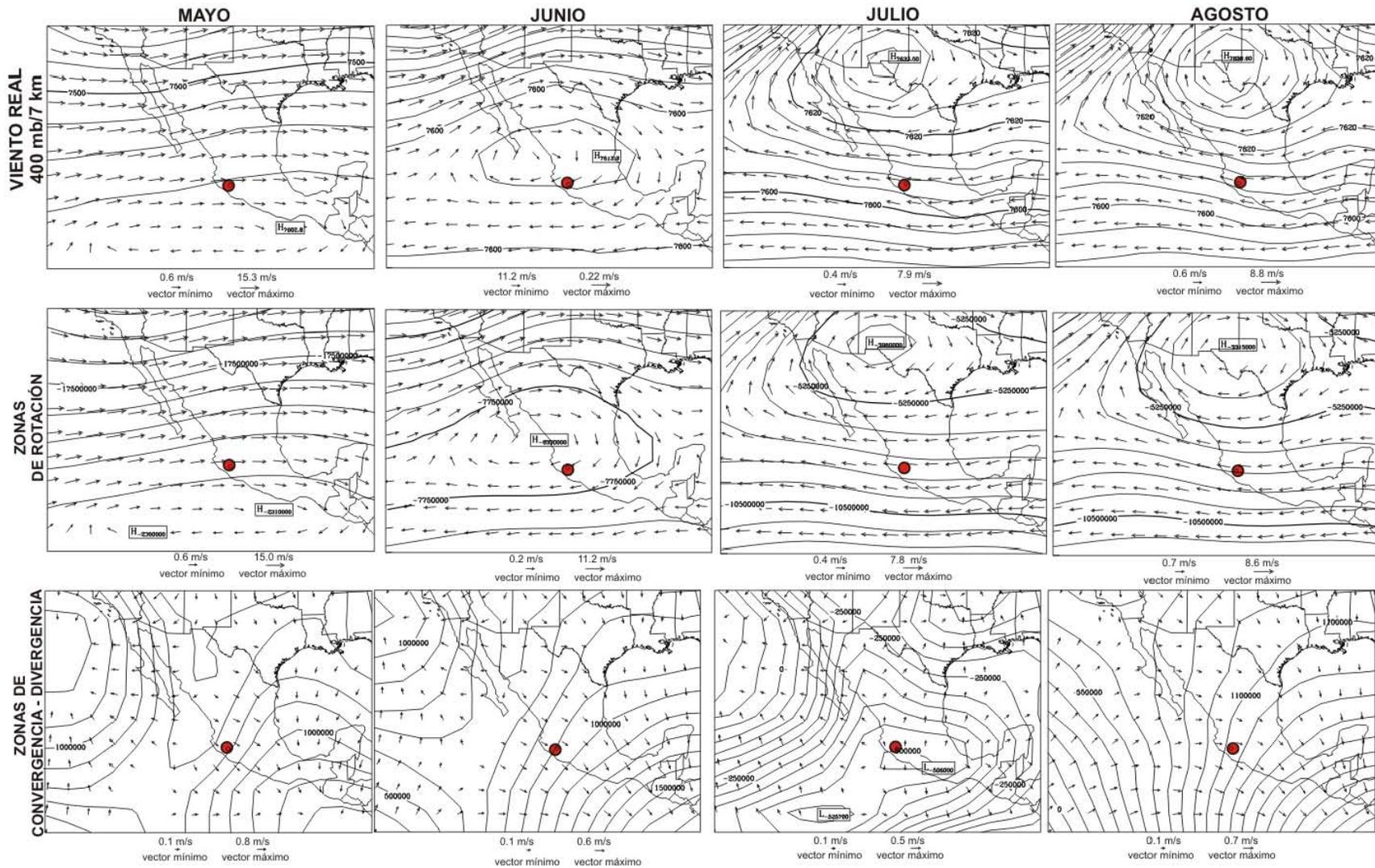


Figura 8. GRUPO II. Campo de viento horizontal a 400 mb. En el VC se observan vientos del oeste en mayo y una circulación anticiclónica en junio. También se identifican vientos divergentes sobre el VC en julio.

Impacto de la caída de ceniza del Volcán de Colima

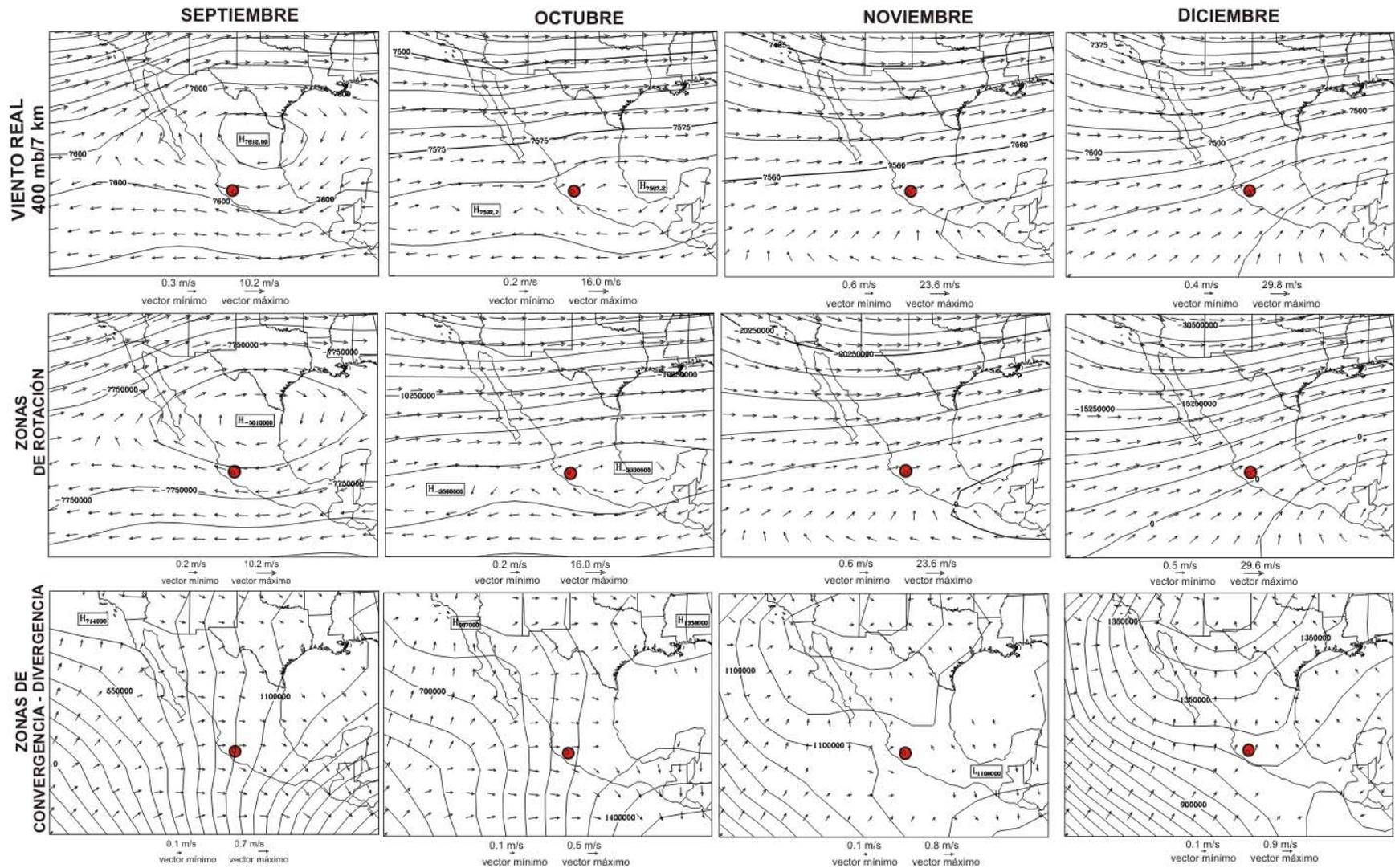


Figura 9. GRUPO II. Campo de viento horizontal a 400 mb. En el VC se presenta una circulación anticiclónica en septiembre y octubre y se presentan vientos del oeste en noviembre y diciembre.

Impacto de la caída de ceniza del Volcán de Colima

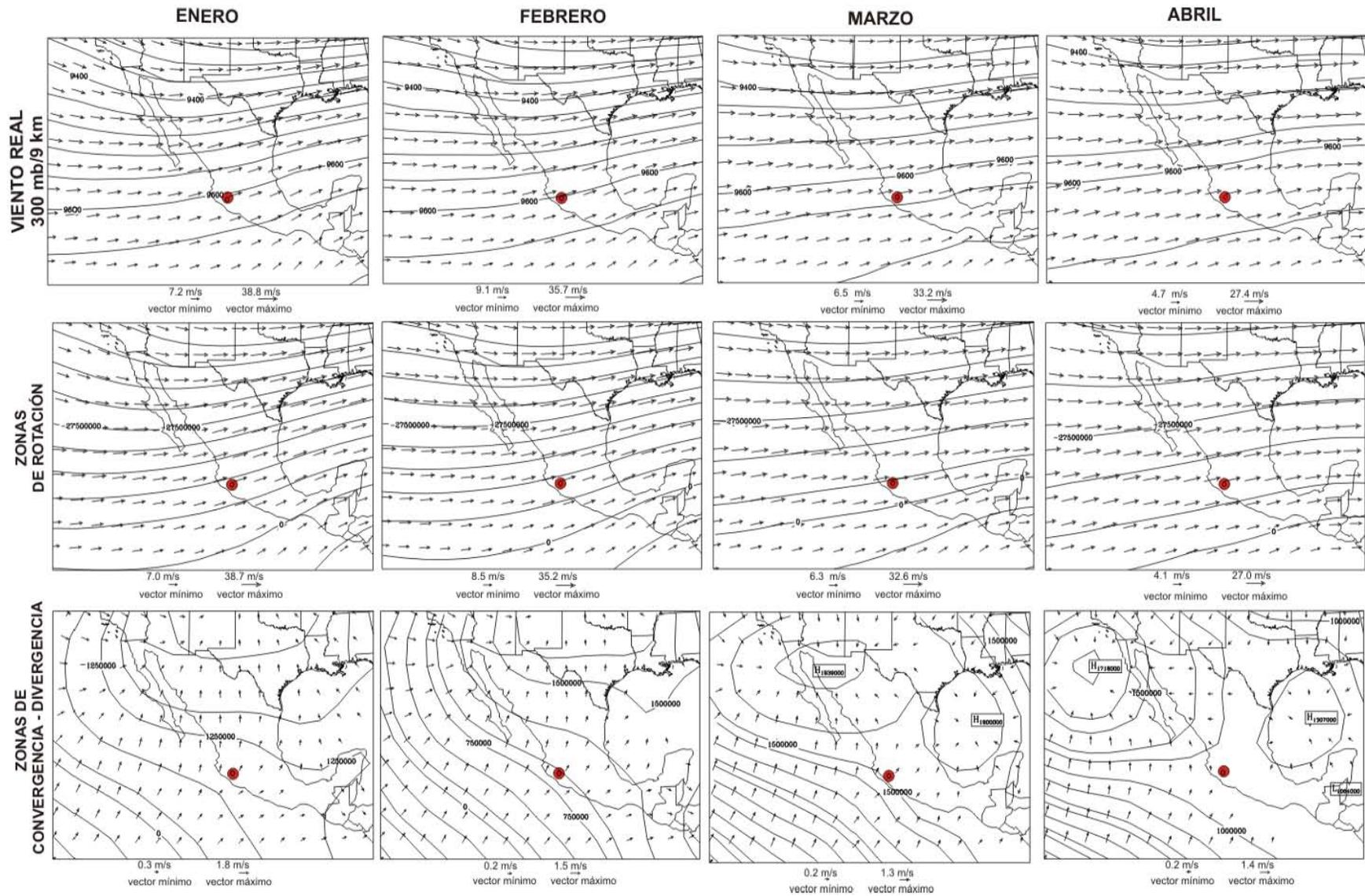


Figura 10. GRUPO II. Campo de viento horizontal a 300 mb. En el VC se presentan vientos del oeste de enero a abril. Se presentan vientos convergentes sobre el noroeste y este de México.

Impacto de la caída de ceniza del Volcán de Colima

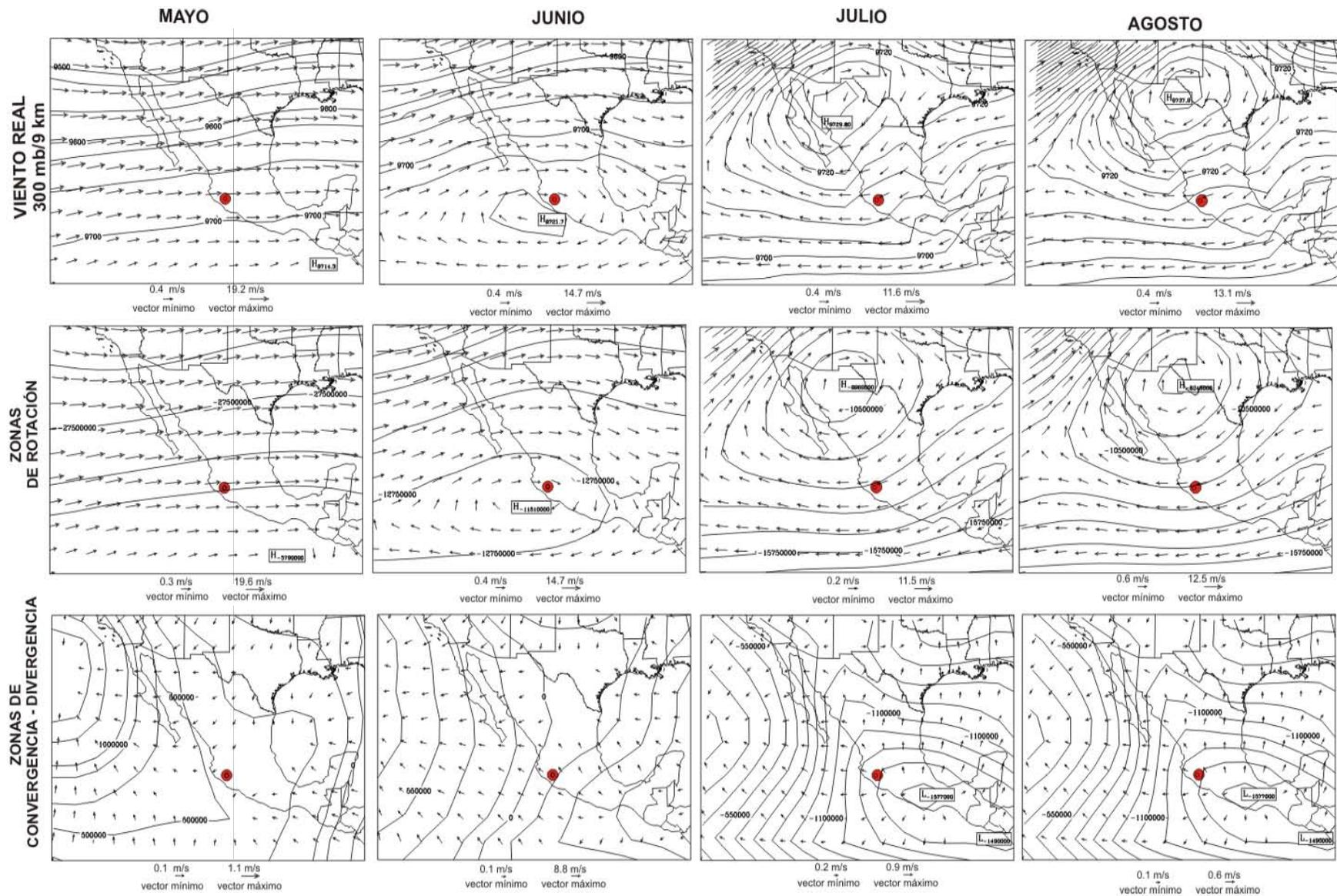


Figura 11. GRUPO II. Campo de viento horizontal a 300 mb. En el VC se observan vientos del oeste en mayo, una circulación anticiclónica en junio, julio y agosto. También se presentan vientos divergentes en julio y agosto.

Impacto de la caída de ceniza del Volcán de Colima

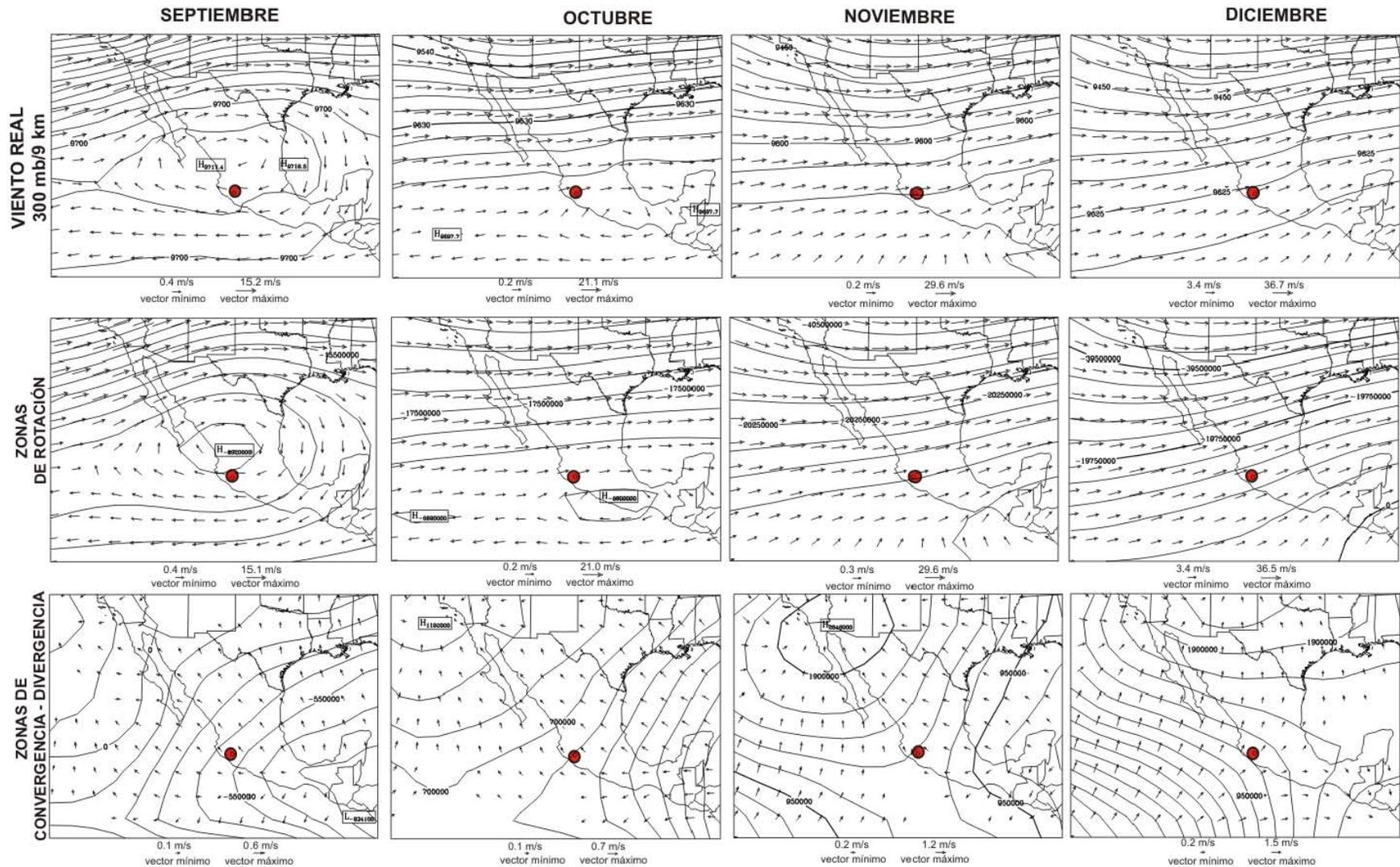


Figura 12. GRUPO II. Campo de viento horizontal a 300 mb. Se presenta en la zona del VC una circulación anticiclónica en septiembre, mientras que en octubre, noviembre y diciembre se presentan vientos del oeste.

Impacto de la caída de ceniza del Volcán de Colima

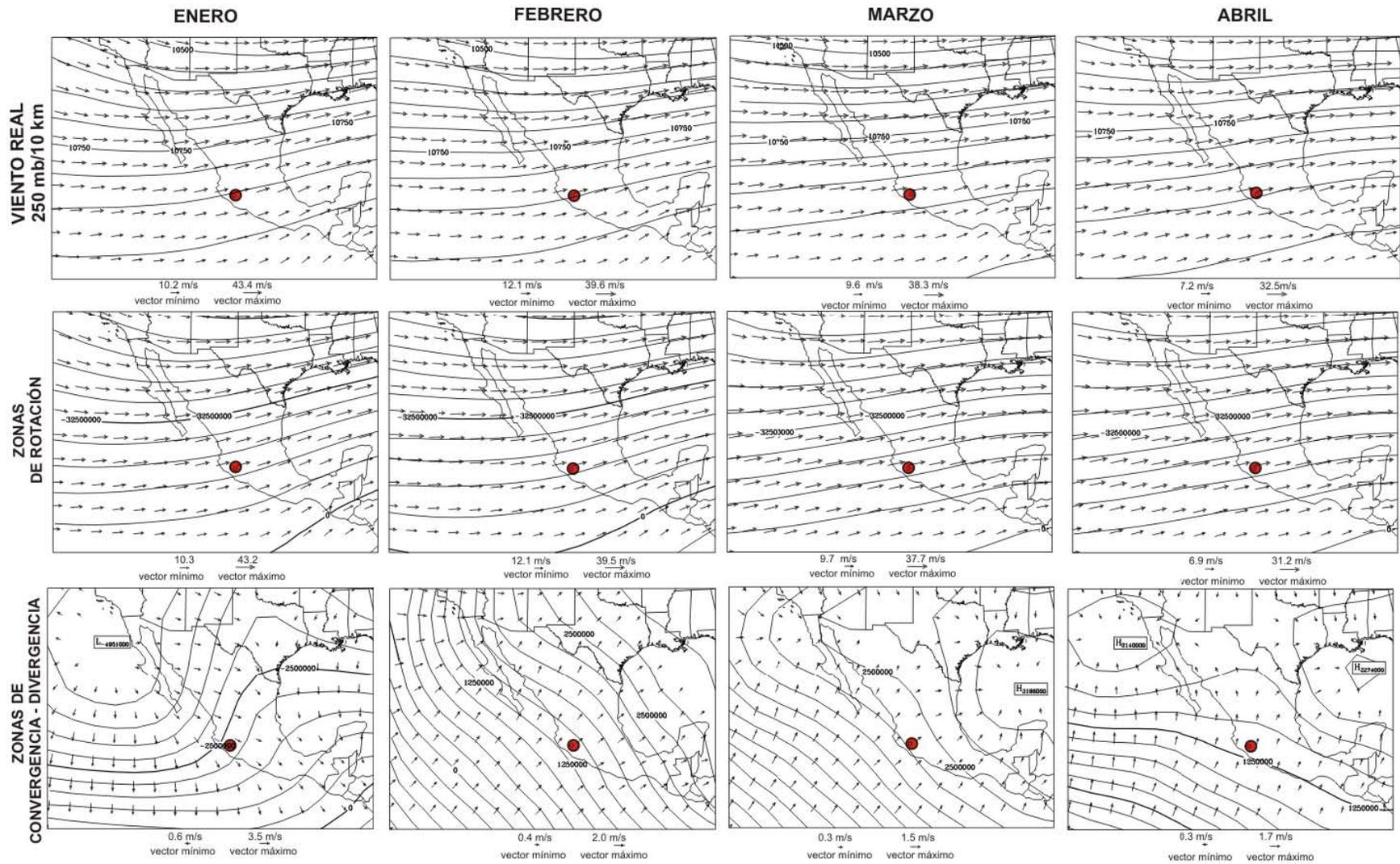


Figura 13. GRUPO II. Campo de viento horizontal a 250 mb. En el VC el viento dominante del oeste se observa en enero, febrero, marzo y abril.

Impacto de la caída de ceniza del Volcán de Colima

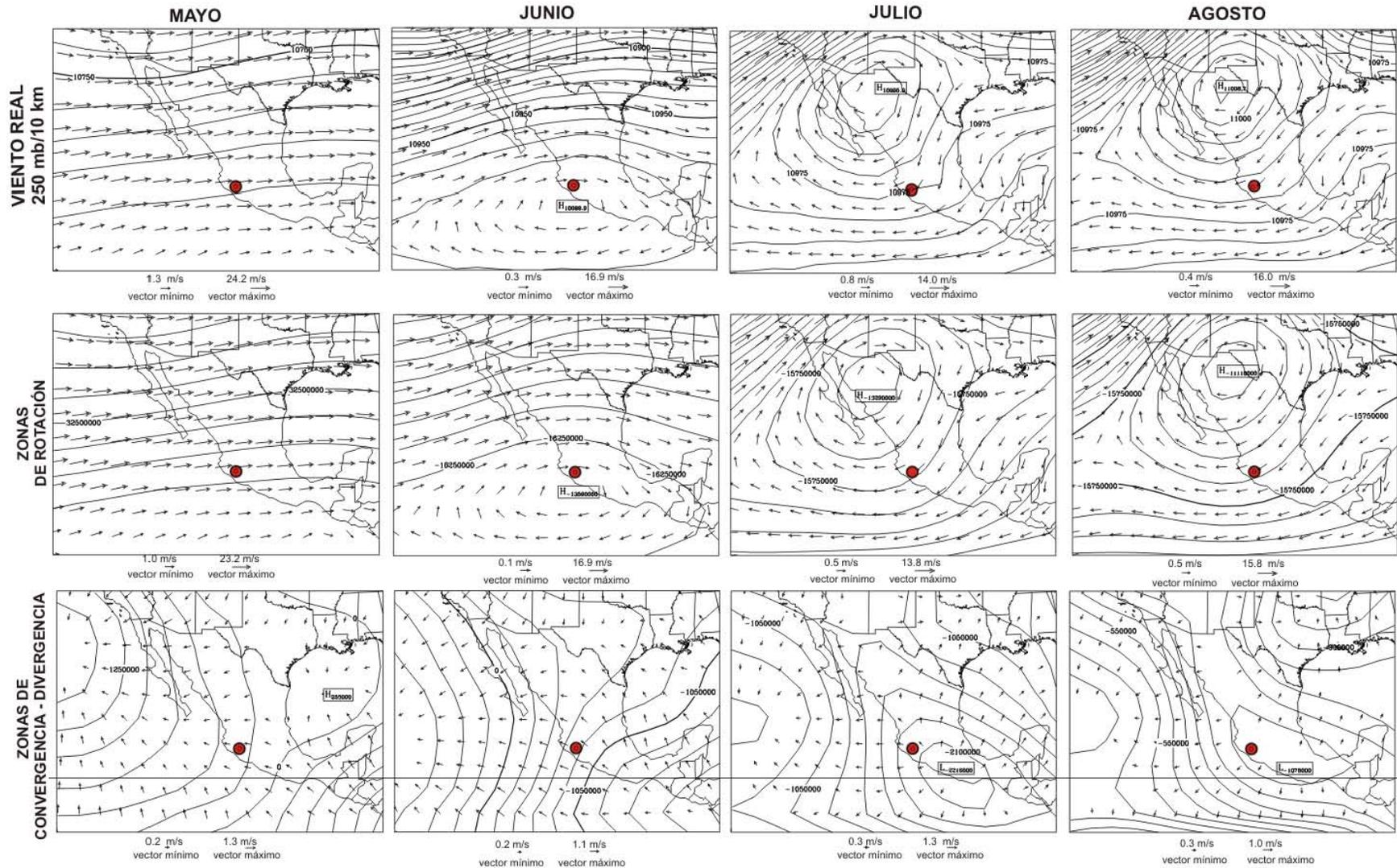


Figura 14. GRUPO II. Campo de viento horizontal a 250 mb. En el VC se observan vientos del oeste en mayo, una circulación anticiclónica en junio, julio y agosto. Los vientos divergentes se presentan en julio en la zona del VC.

Impacto de la caída de ceniza del Volcán de Colima

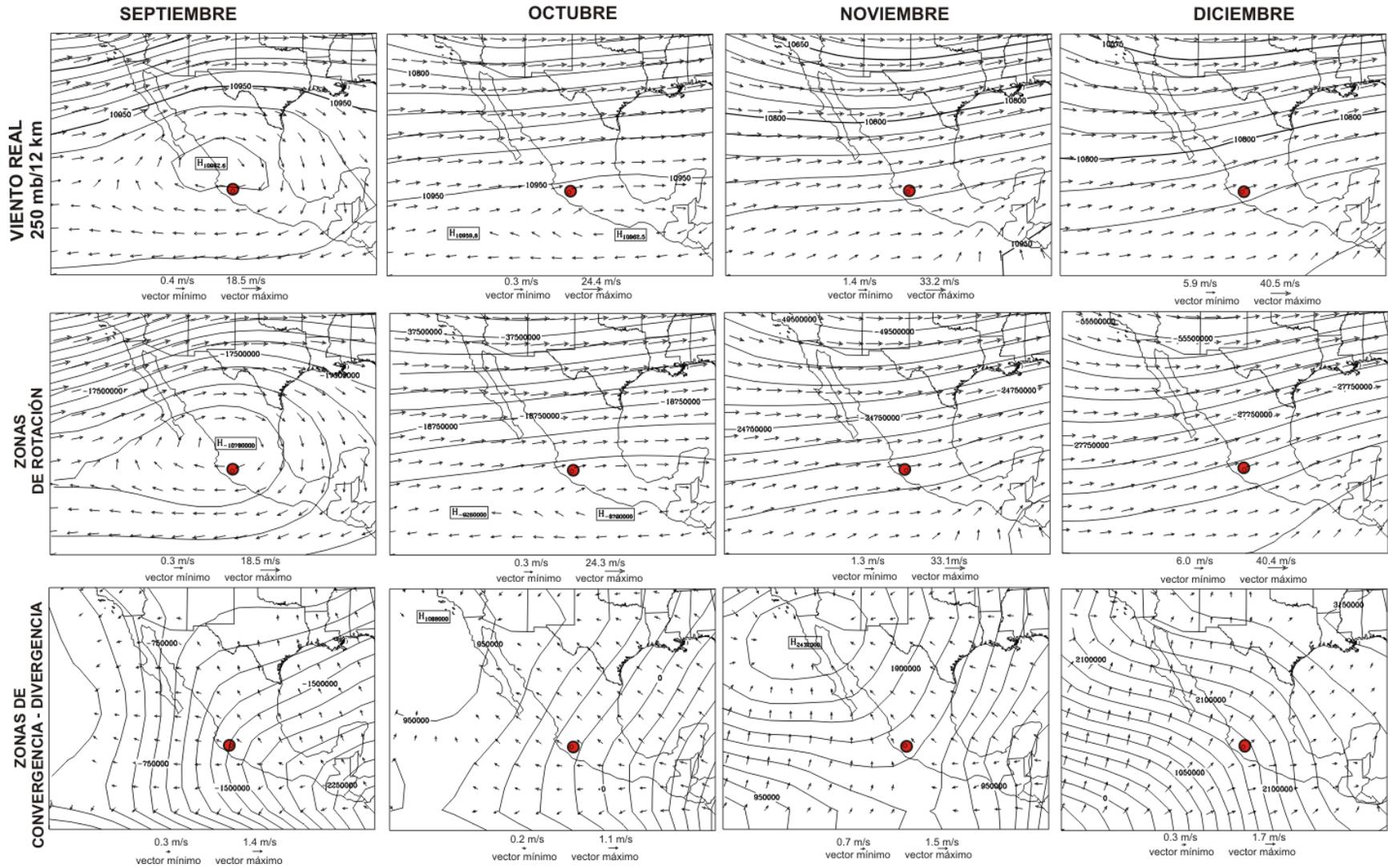


Figura 15. GRUPO II. Campo de viento horizontal a 250 mb. Se presenta en septiembre una circulación anticiclónica que afecta al VC. De octubre a diciembre se presentan vientos del oeste.

Impacto de la caída de ceniza del Volcán de Colima

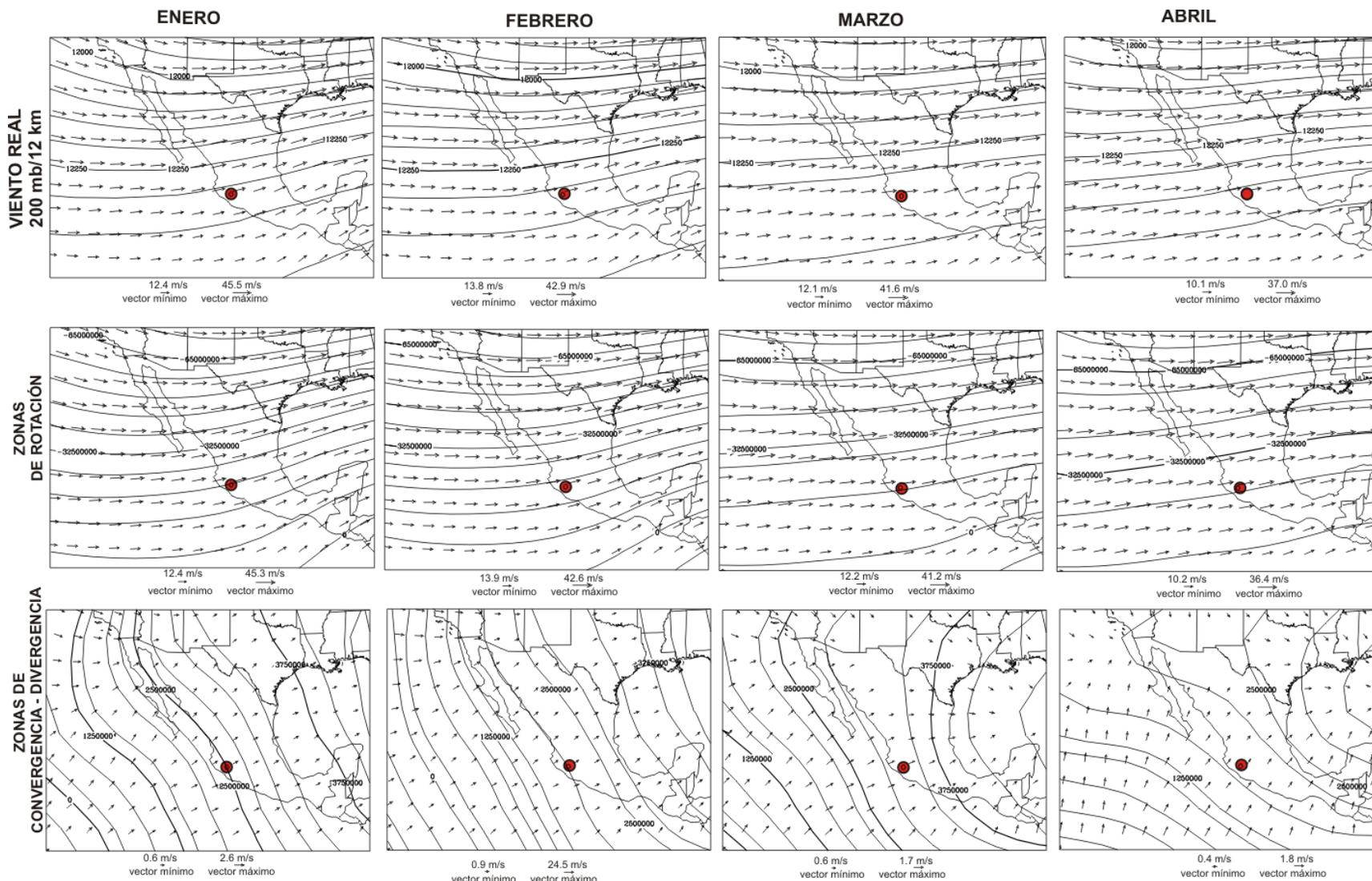


Figura 16. Campo de viento horizontal a 200 mb. En el VC predominan los vientos del oeste en los meses de enero a abril.

Impacto de la caída de ceniza del Volcán de Colima

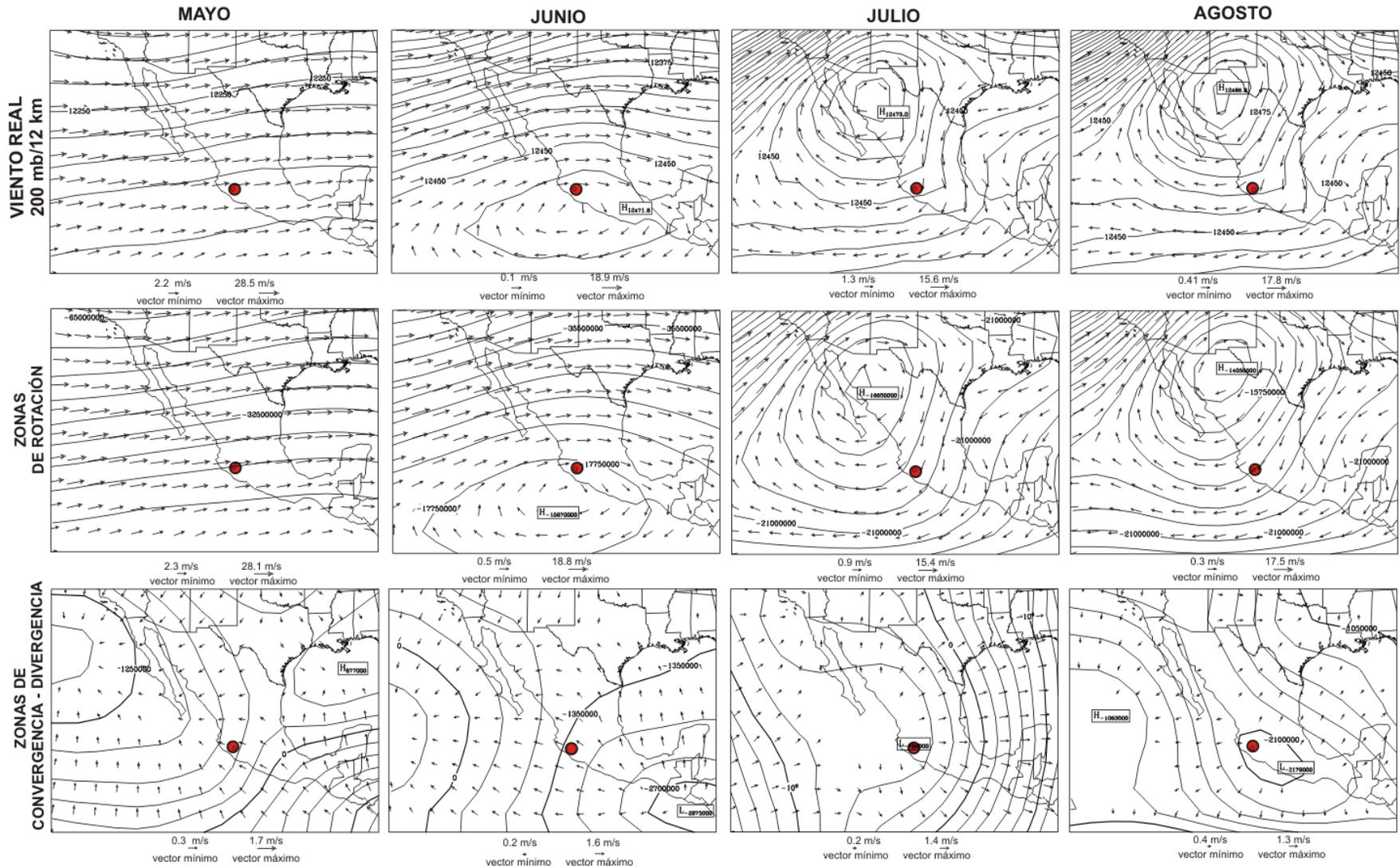


Figura 16. GRUPO II. Campo de viento horizontal a 200 mb. En el VC se observan vientos del oeste en mayo, mientras que en junio, julio y agosto una circulación anticiclónica asociadas al monzón anticiclónico de Norteamérica afecta al VC.

Impacto de la caída de ceniza del Volcán de Colima

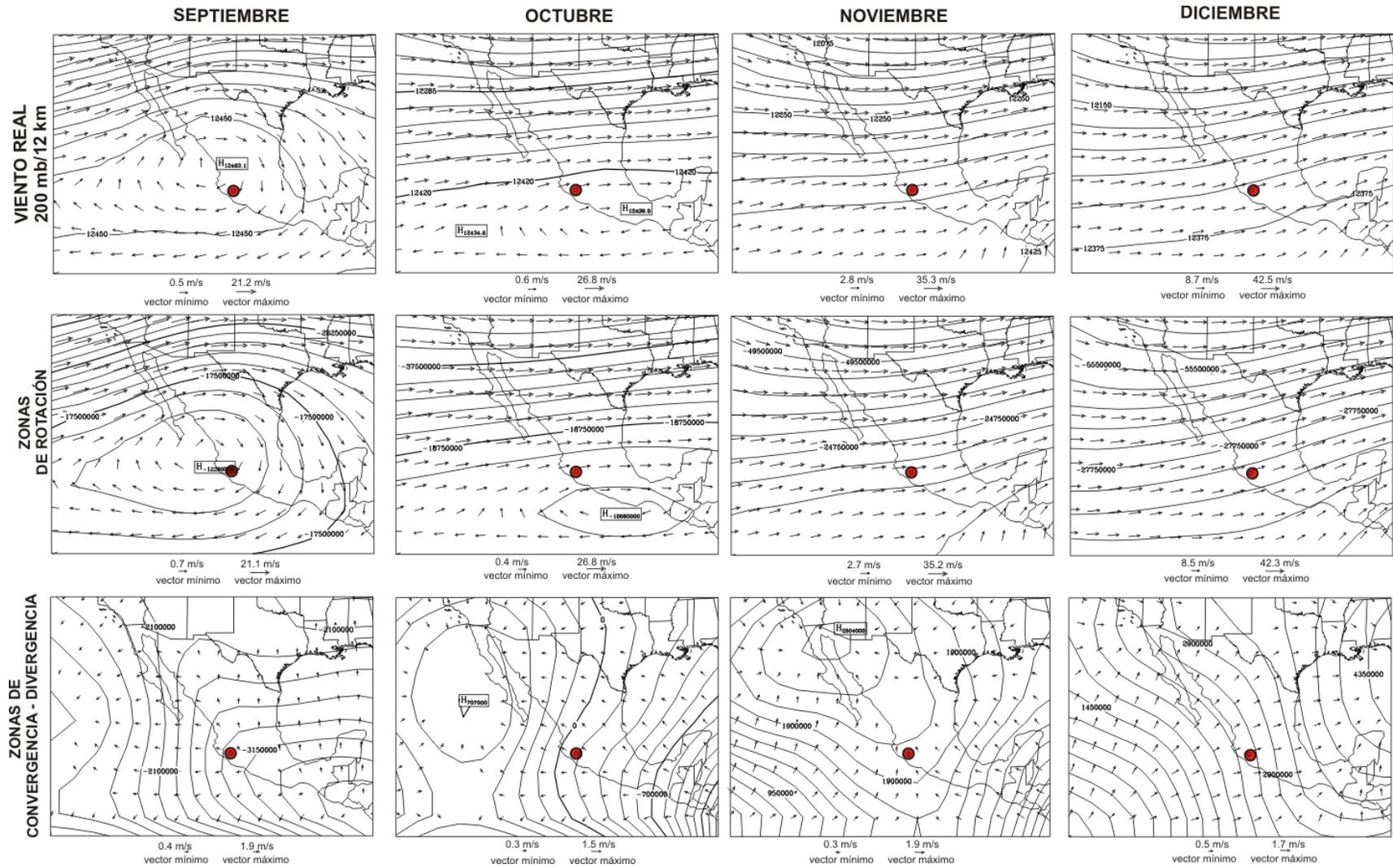


Figura18. GRUPO II. Campo de viento horizontal a 200 mb. En Septiembre se presenta una circulación anticiclónica que afecta al VC, mientras que en octubre, noviembre y diciembre dominan los vientos del oeste.

Impacto de la caída de ceniza del Volcán de Colima

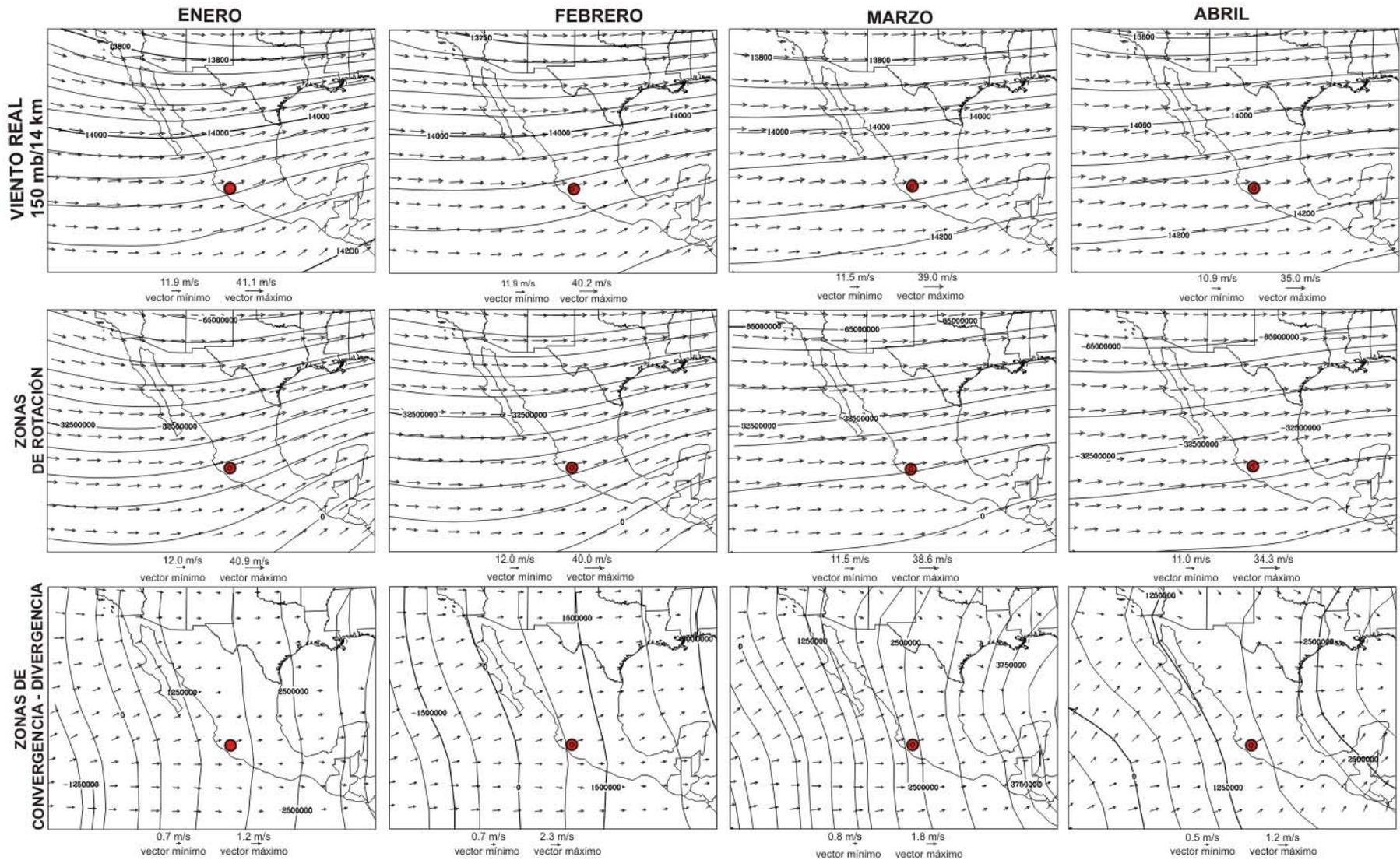


Figura 19. GRUPO III. Campo de viento horizontal a 150 mb. En el VC se observan vientos del oeste en enero, febrero, marzo y abril.

Impacto de la caída de ceniza del Volcán de Colima

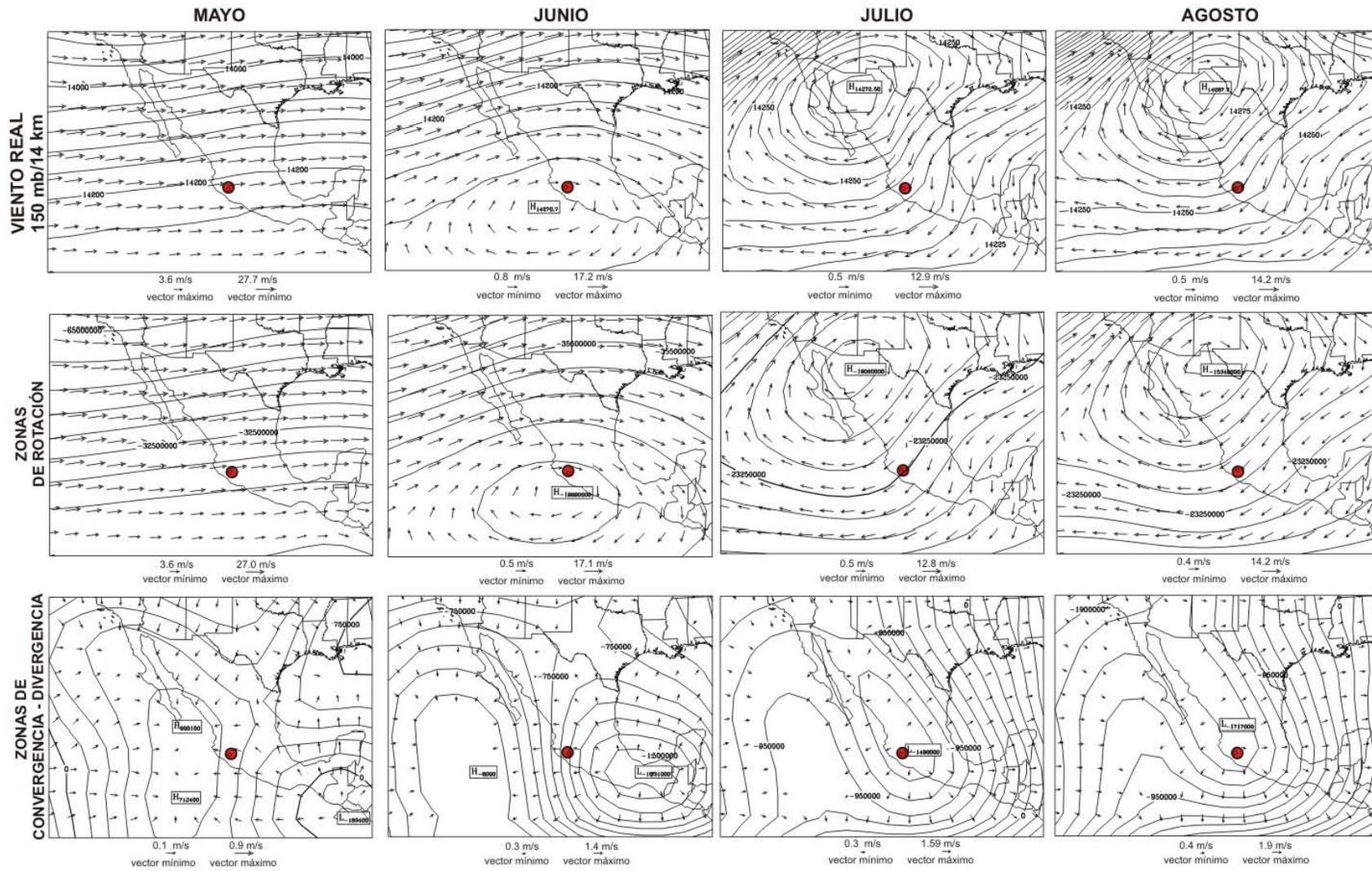


Figura 20. GRUPO III. Campo de viento horizontal a 150 mb. En el VC se observan vientos del oeste en mayo, una circulación anticiclónica asociada al monzón anticiclónico norteamericano en junio, julio y agosto. También se observan vientos convergentes en mayo y vientos divergentes en julio a agosto que afectan al

VC.

Impacto de la caída de ceniza del Volcán de Colima

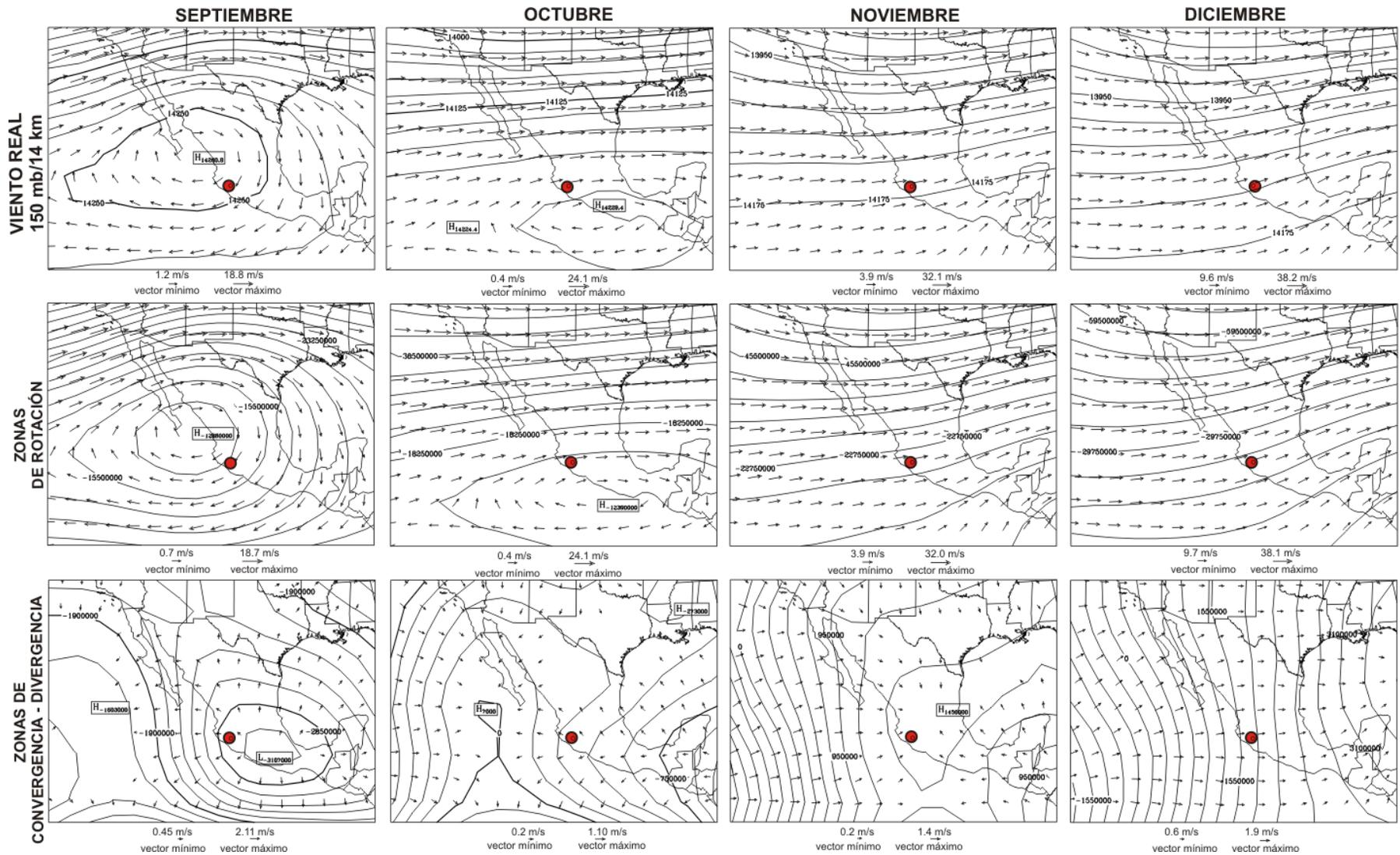


Figura 21. GRUPO III. Campo de viento horizontal a 150 mb. Se observa una circulación anticiclónica en septiembre y octubre que afecta al VC. En noviembre y diciembre se presentan vientos del oeste. También se identifican vientos divergentes en septiembre.

Impacto de la caída de ceniza del Volcán de Colima

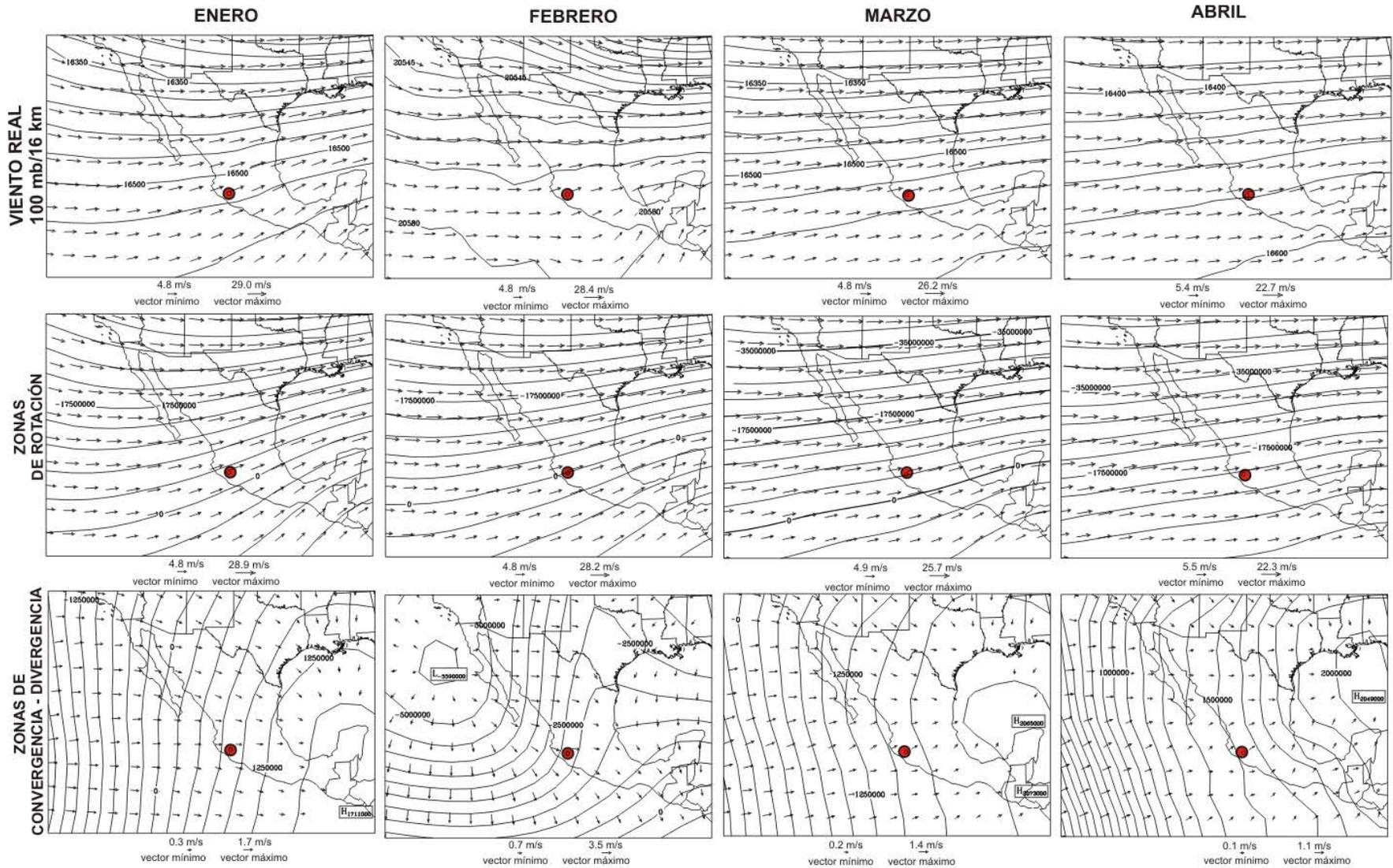


Figura 22. GRUPO III. Campo de viento horizontal de enero a abril en 100 mb. En el VC el viento real muestra una componente del W de enero a abril.

Impacto de la caída de ceniza del Volcán de Colima

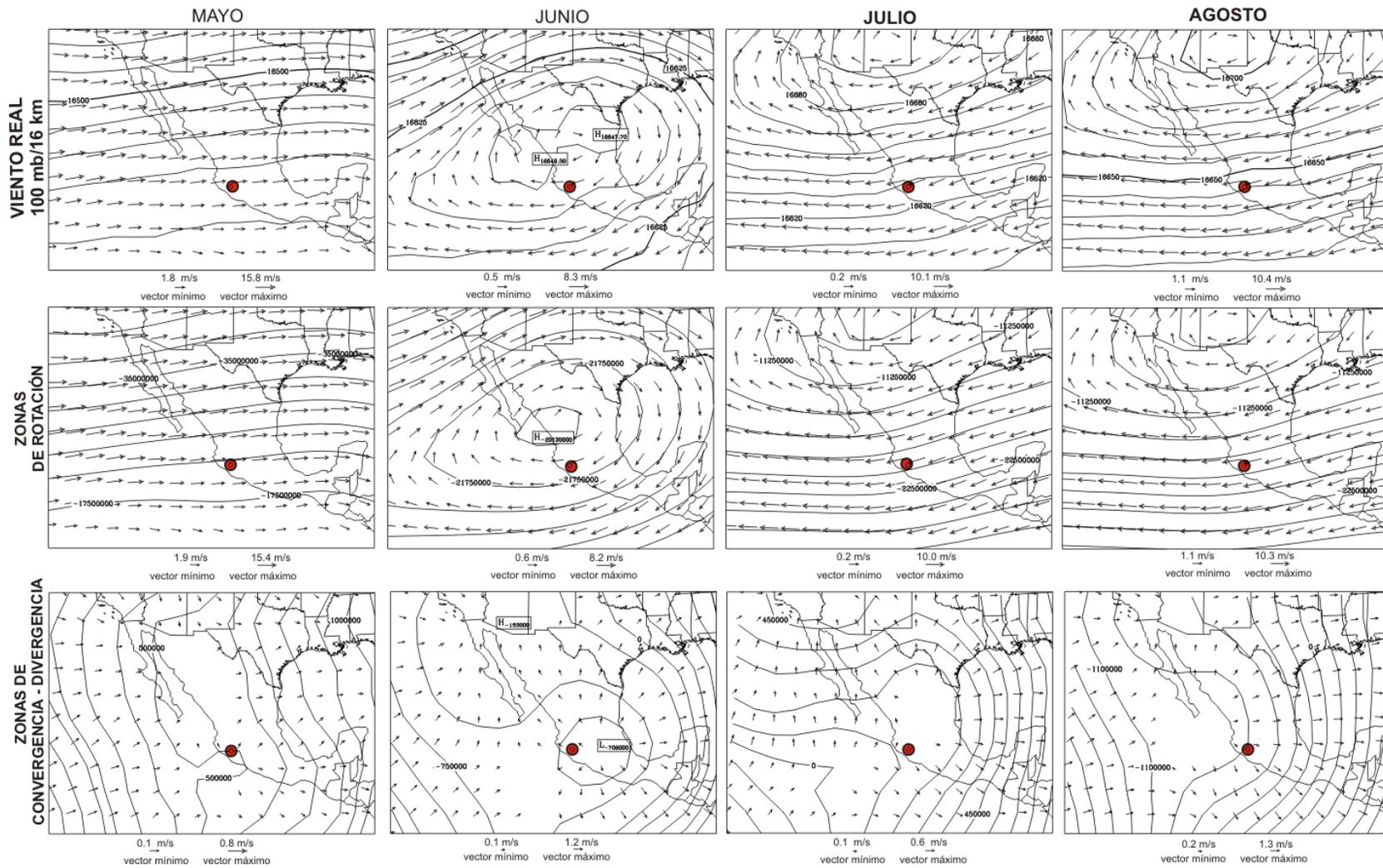


Figura 23. GRUPO III. Campo de viento horizontal a 100 mb. En el VC se observan vientos del W en mayo y vientos del E en julio y agosto. Se presenta una circulación anticiclónica sobre el VC en junio. También se identifican vientos divergentes en el centro de México afectando al VC de mayo a agosto.

Impacto de la caída de ceniza del Volcán de Colima

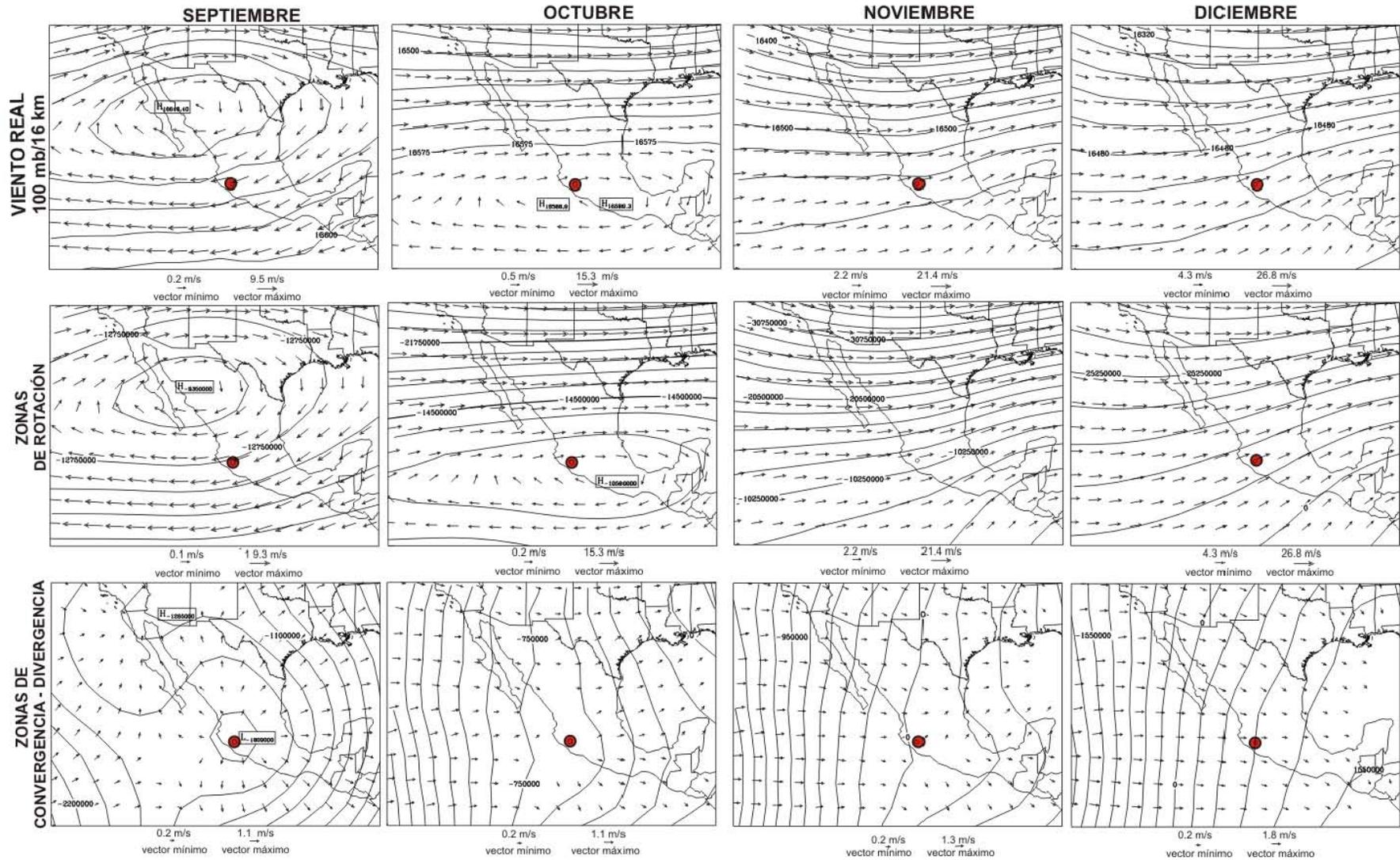


Figura 24. GRUPO III. Campo de viento horizontal a 100 mb. Septiembre y octubre presentan circulaciones anticiclónicas afectando al VC. De noviembre a diciembre se presentan vientos del W. También se identifican vientos divergentes sobre el VC en septiembre y octubre.

Impacto de la caída de ceniza del Volcán de Colima

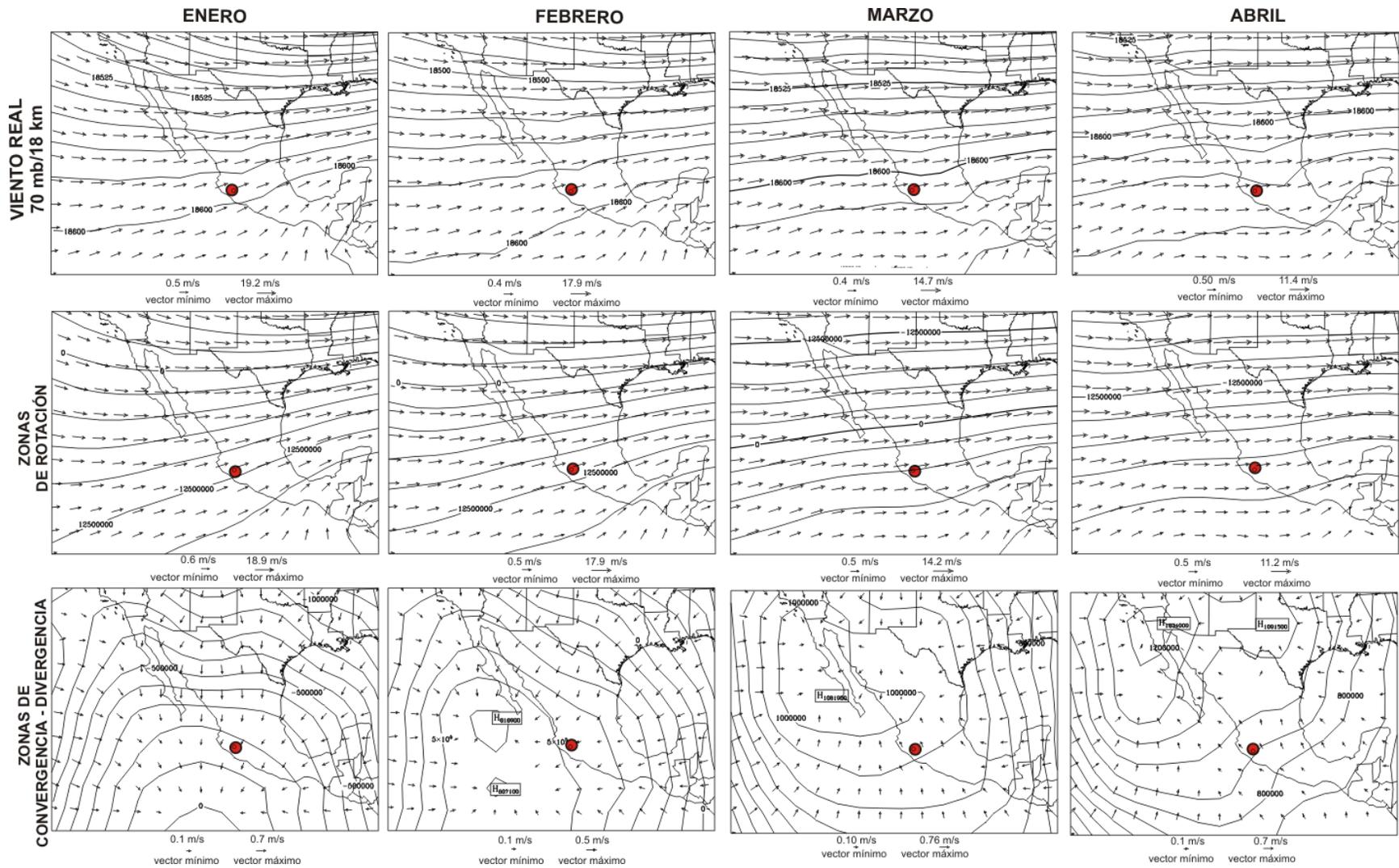


Figura 25. GRUPO IV. Campo de viento horizontal a 70 mb. En el VC se presentan vientos del oeste de enero a abril.

Impacto de la caída de ceniza del Volcán de Colima

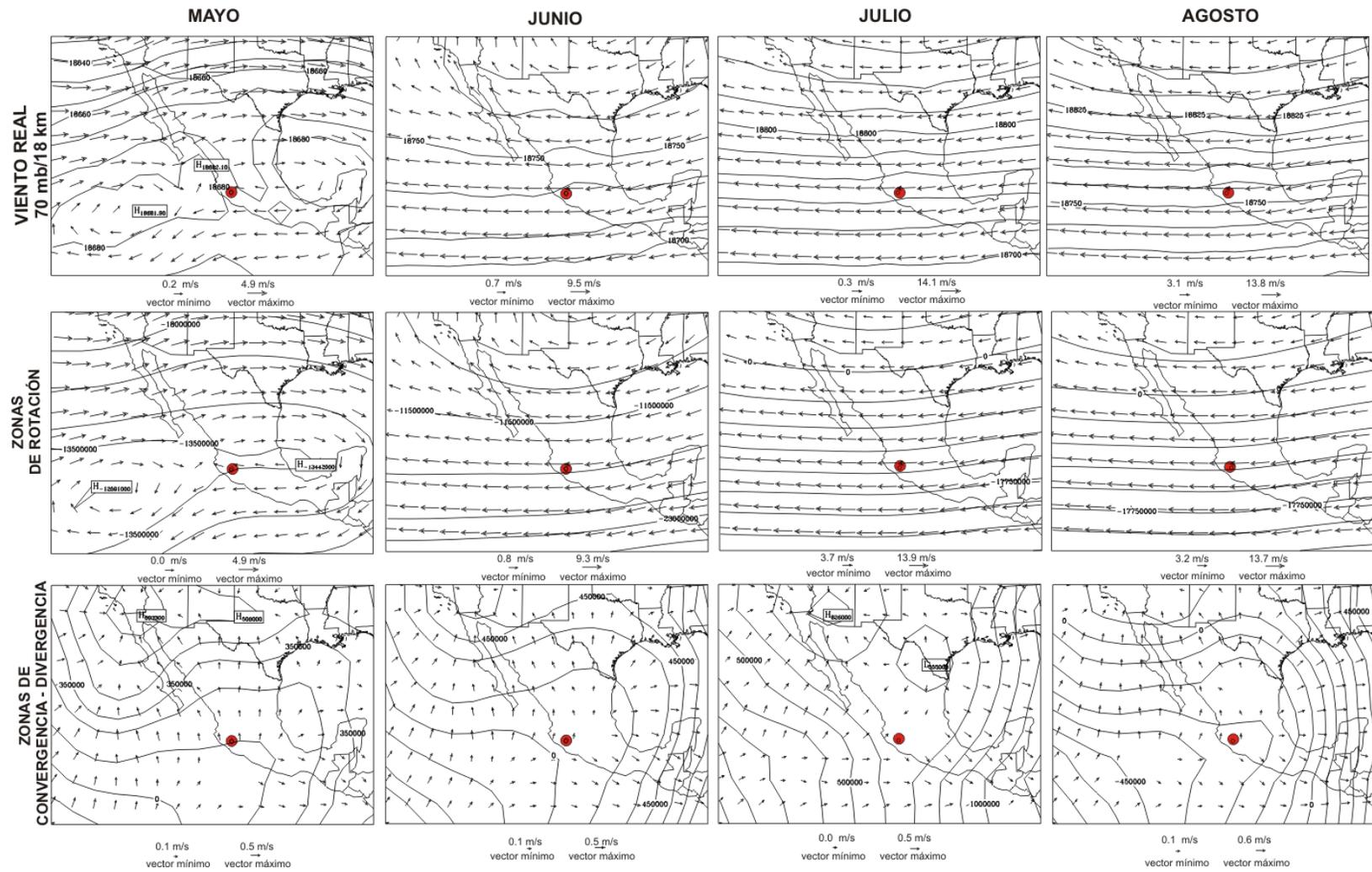


Figura 26. GRUPO IV. Campo de viento horizontal a 70 mb. En el VC se observa una circulación anticiclónica en mayo y vientos del este en junio, julio y agosto.

Impacto de la caída de ceniza del Volcán de Colima

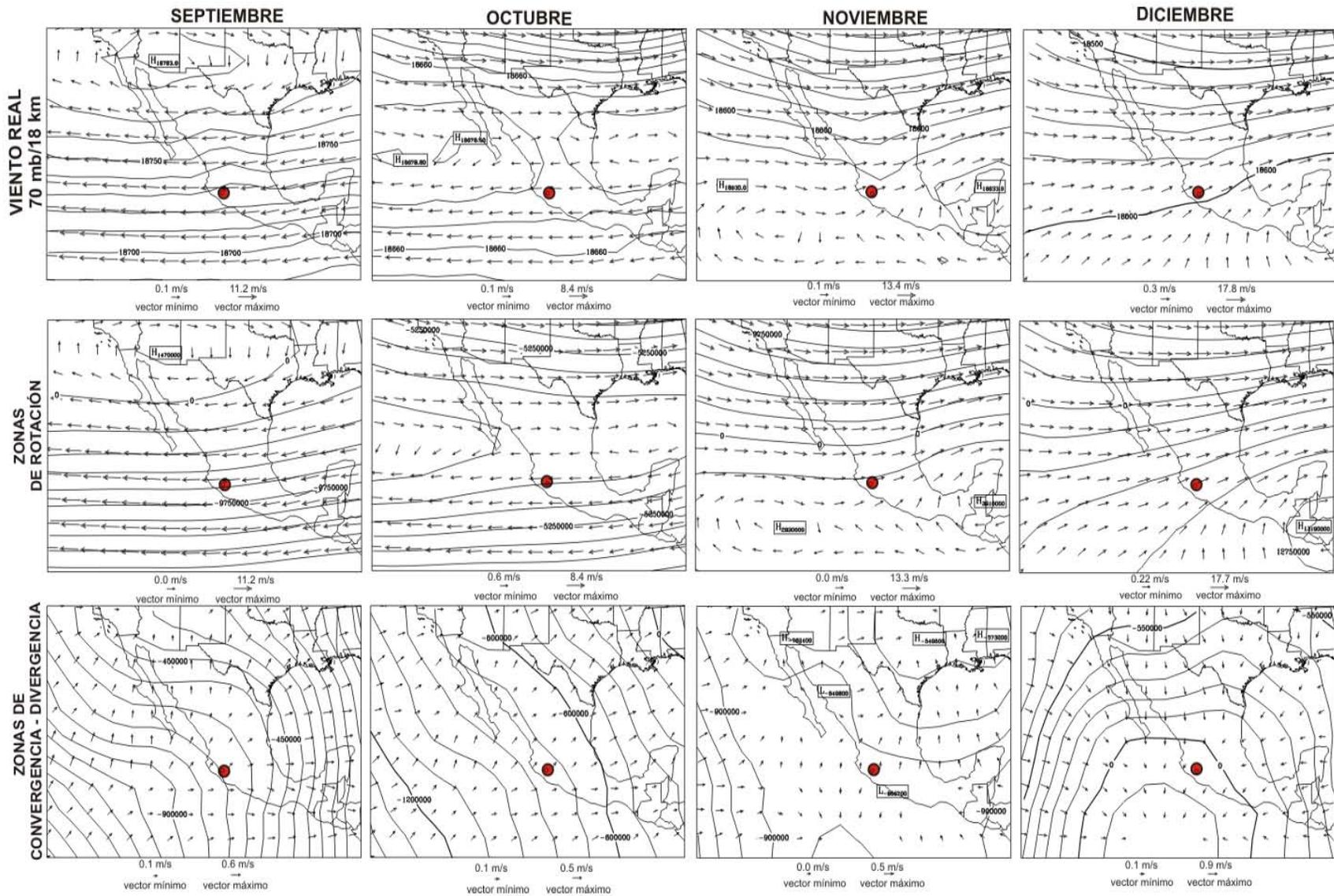


Figura 27. GRUPO IV. Campo de viento horizontal a 70 mb. En el VC presentan vientos del este en septiembre y octubre y vientos del oeste en noviembre y diciembre.

Impacto de la caída de ceniza del Volcán de Colima

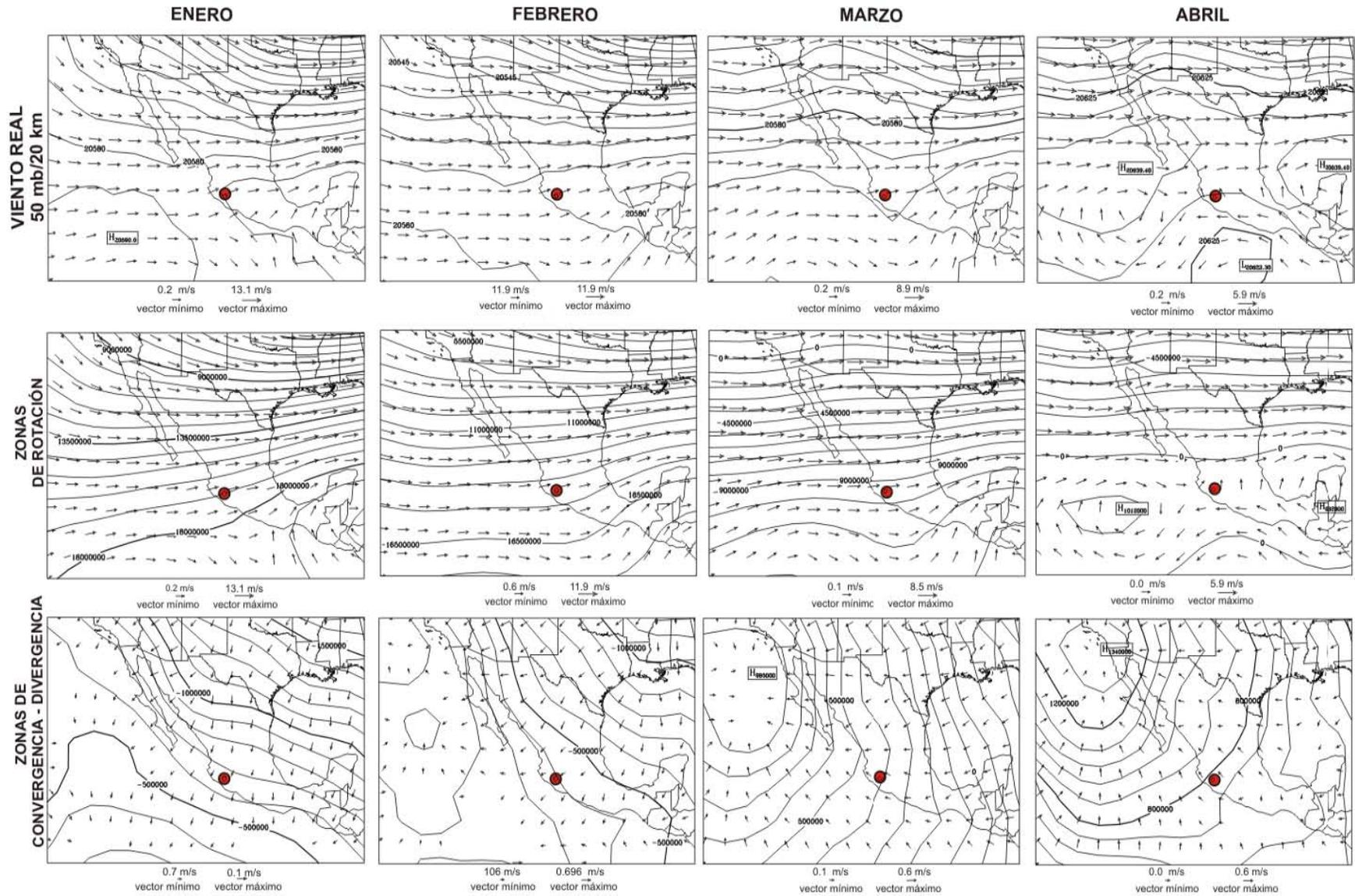


Figura28. GRUPO IV. Campo de viento horizontal a 50 mb. En el VC se observan vientos del oeste de enero a marzo y dos zonas de rotación en abril.

Impacto de la caída de ceniza del Volcán de Colima

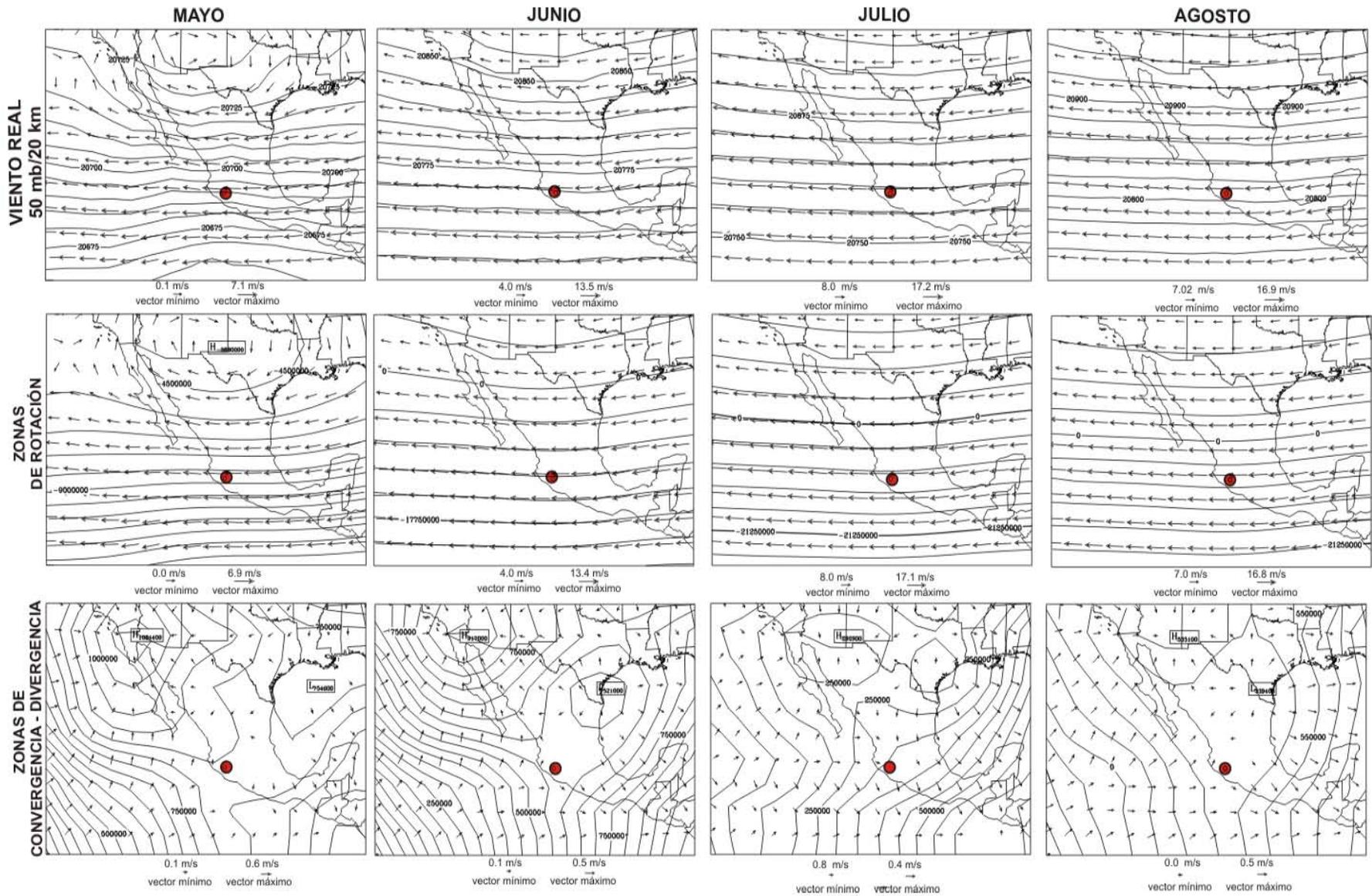


Figura 29. GRUPO IV. Campo de viento horizontal a 50 mb. En el VC se observan vientos del este en mayo, junio, julio y agosto.

Impacto de la caída de ceniza del Volcán de Colima

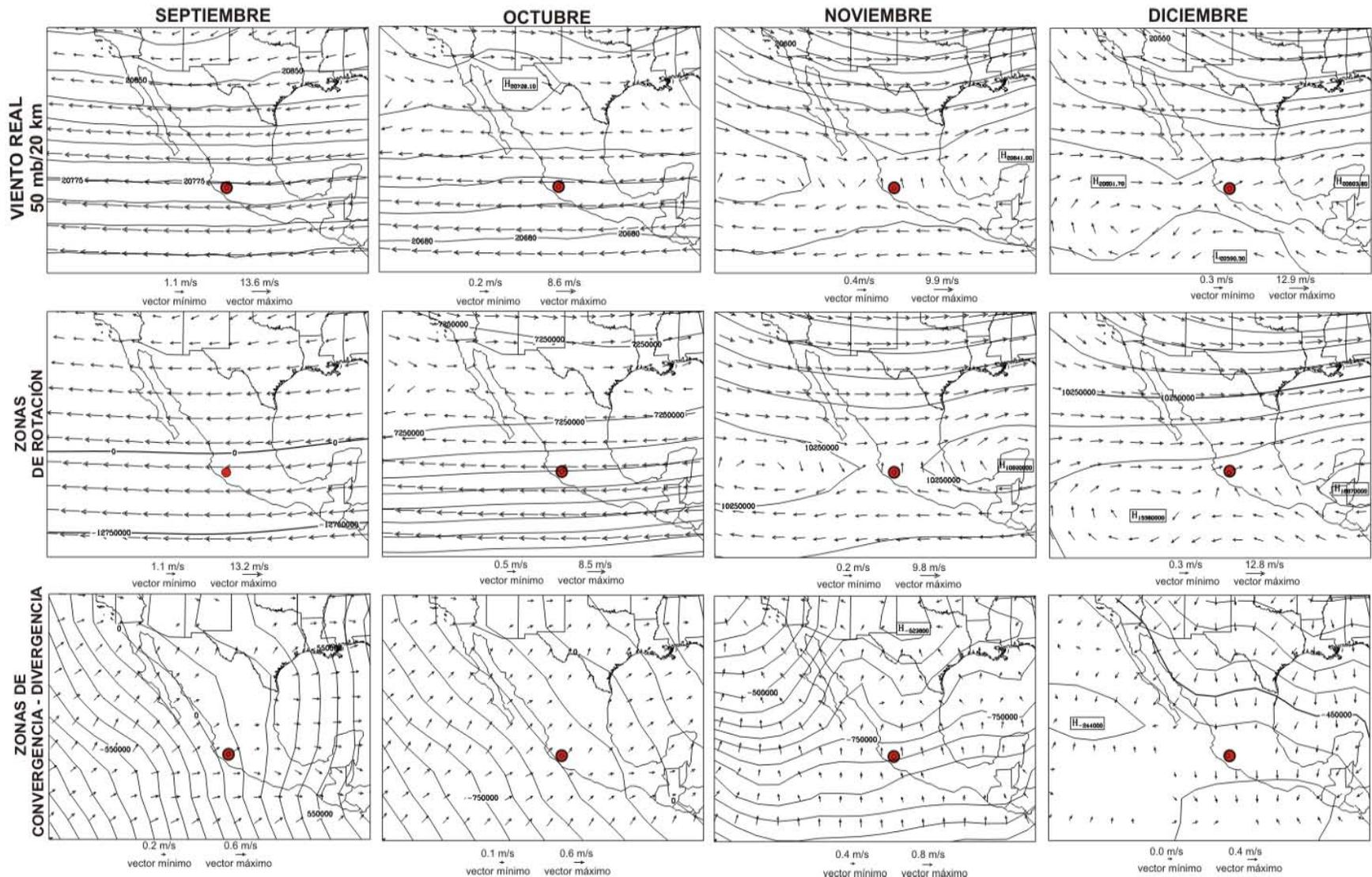


Figura 30. GRUPO IV. Campo de viento horizontal a 50 mb. Se presentan vientos del este en septiembre y octubre. En noviembre y diciembre se observan dos circulaciones que afectan al VC.

Impacto de la caída de ceniza del Volcán de Colima

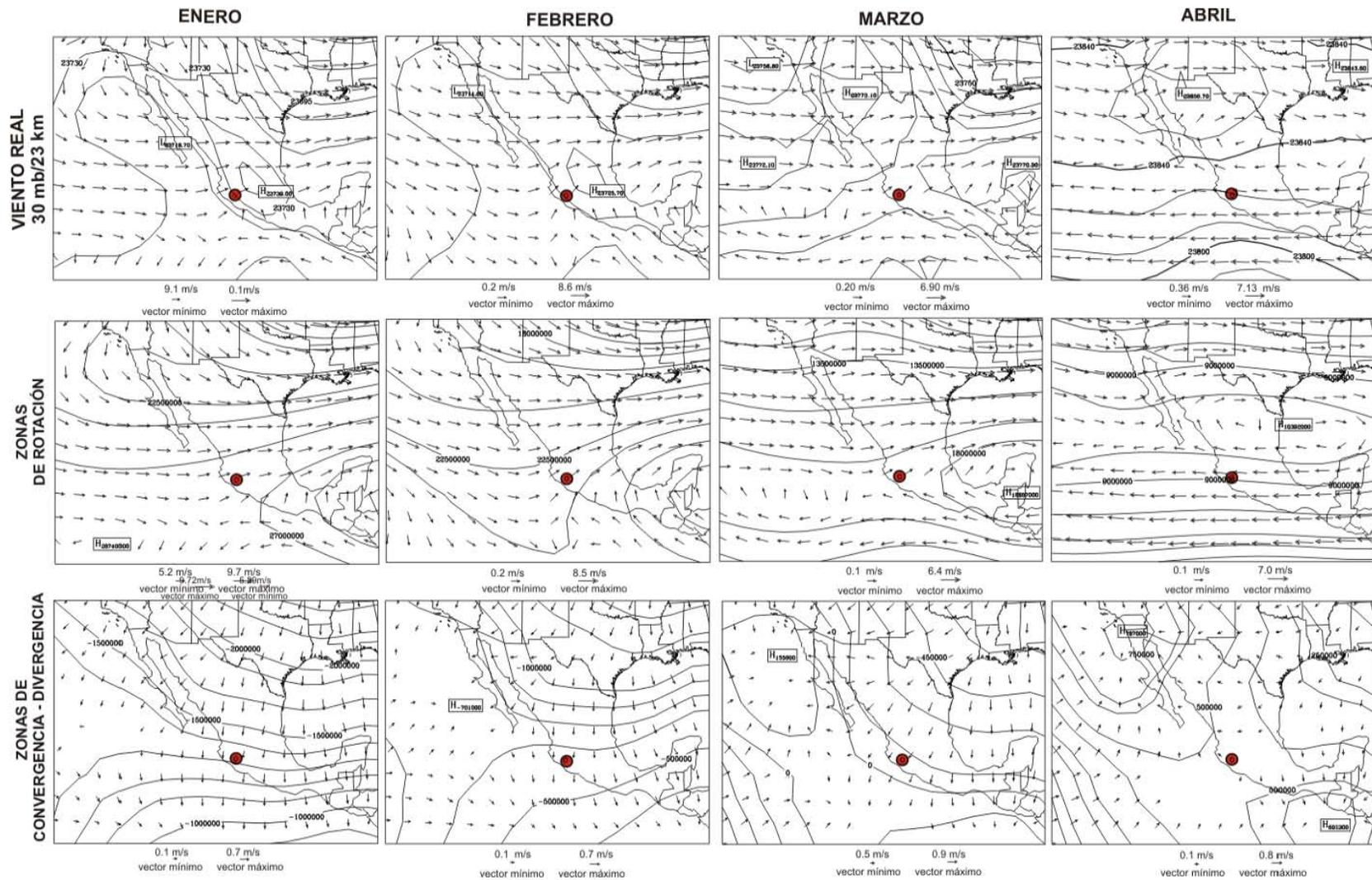


Figura 31. GRUPO V. Campo de viento horizontal a 30 mb. En el VC se observan vientos del oeste y suroeste de enero a marzo y vientos del este en abril.

En marzo el VC es afectado por dos circulaciones anticiclónicas.

Impacto de la caída de ceniza del Volcán de Colima

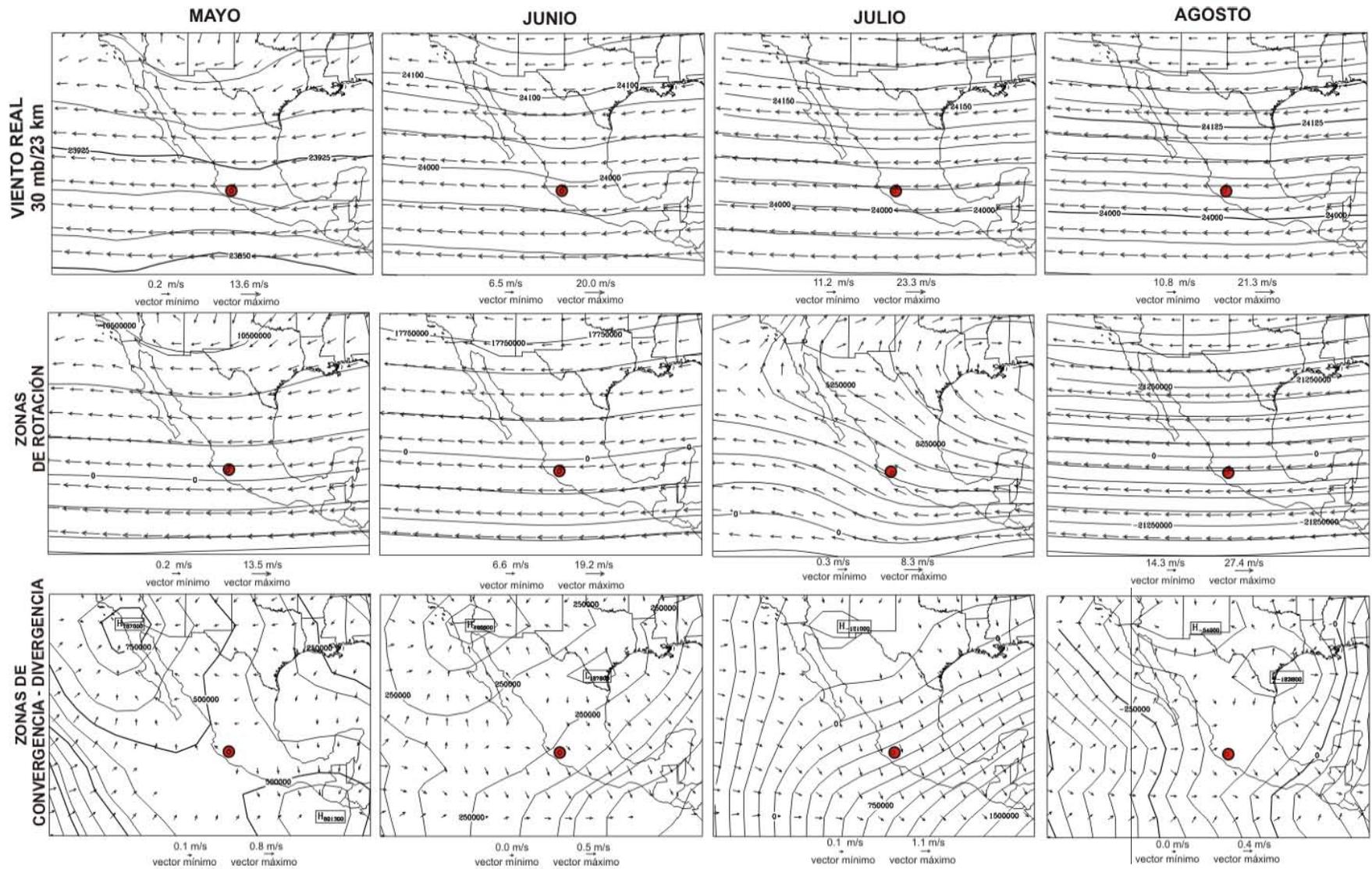


Figura 32. GRUPO V. Campo de viento horizontal a 30 mb. Se presentan vientos zonales del este de mayo a agosto.

Impacto de la caída de ceniza del Volcán de Colima

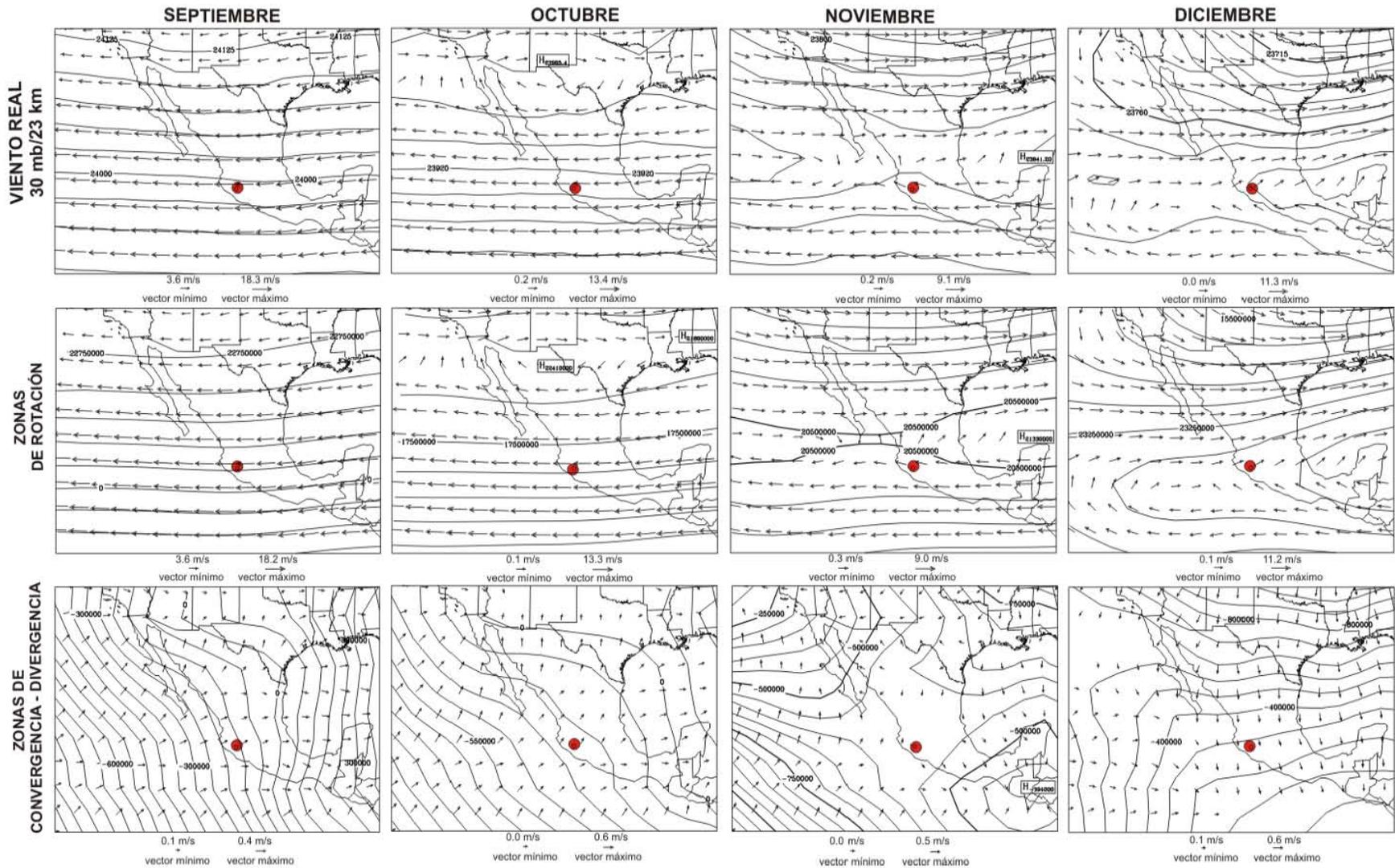


Figura 33. GRUPO V. Campo de viento horizontal a 30 mb. En la zona del VC se presentan vientos del este de septiembre a noviembre. Se observa una circulación anticiclónica que afecta a la zona del VC en noviembre y diciembre.

Impacto de la caída de ceniza del Volcán de Colima

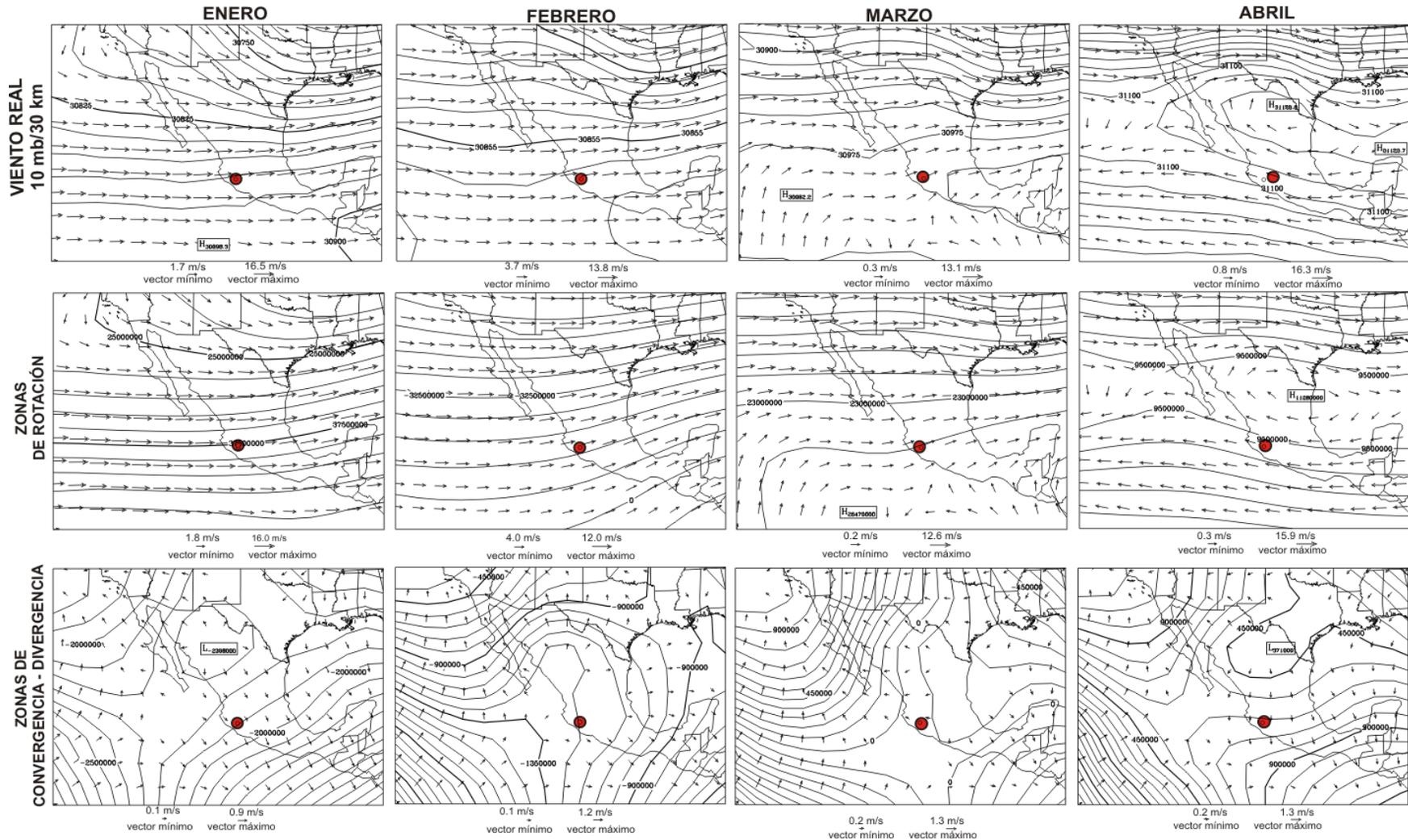


Figura 34. GRUPO V. Campo de viento horizontal de enero a abril en 10 mb. Se presentan vientos del oeste de enero a marzo y vientos del este en abril. Se observan circulaciones anticiclónicas sobre el sur y centro norte de México en marzo-abril. También se identifican vientos divergentes al norte de México febrero y abril.

Impacto de la caída de ceniza del Volcán de Colima

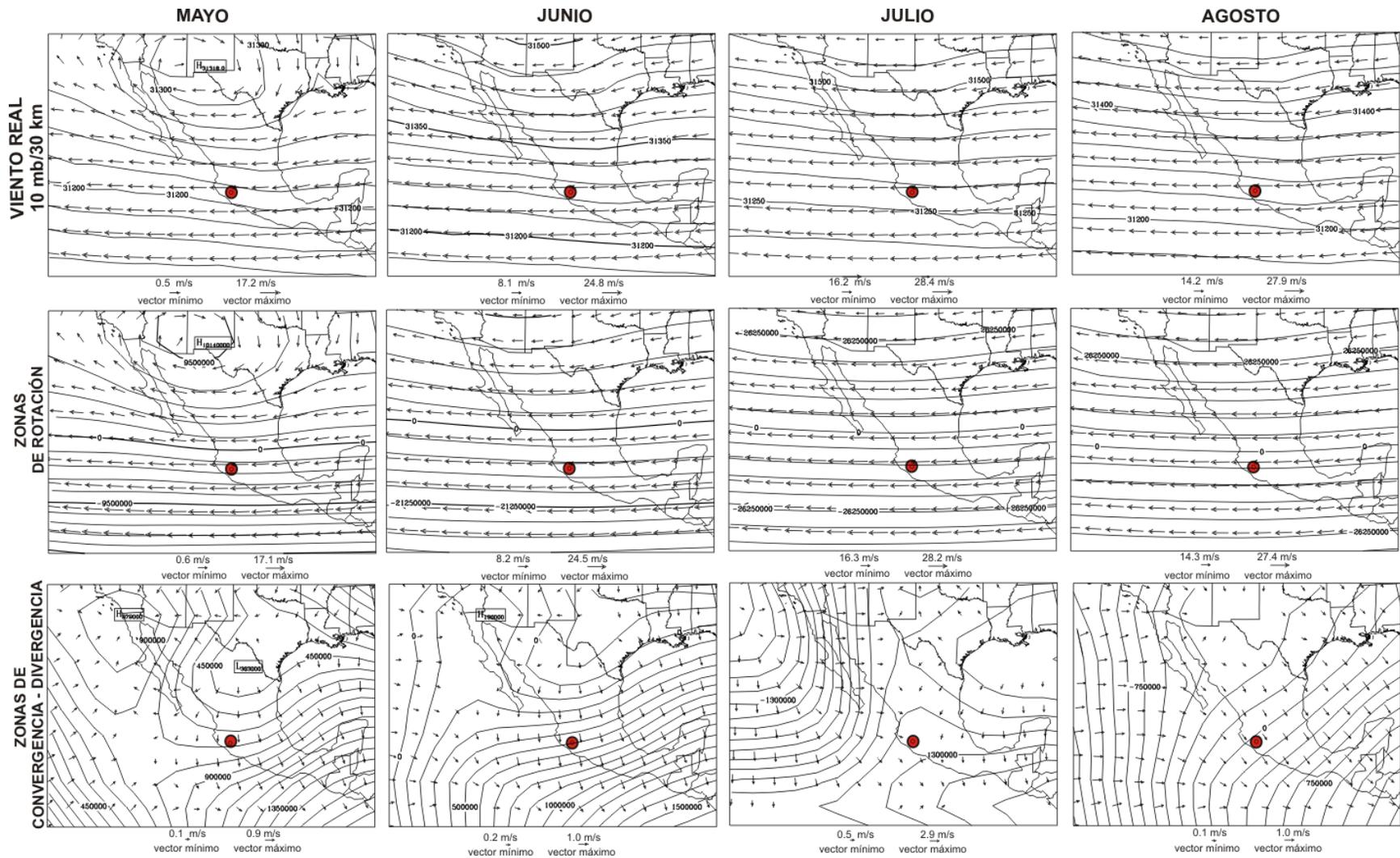


Figura 35. GRUPO V. Campo de viento horizontal de mayo a agosto en 10 mb. Se observan vientos del oeste de mayo a agosto. Se presenta una circulación anticiclónica al norte de México en mayo. Se identifican vientos divergentes a norte de México en mayo y junio.

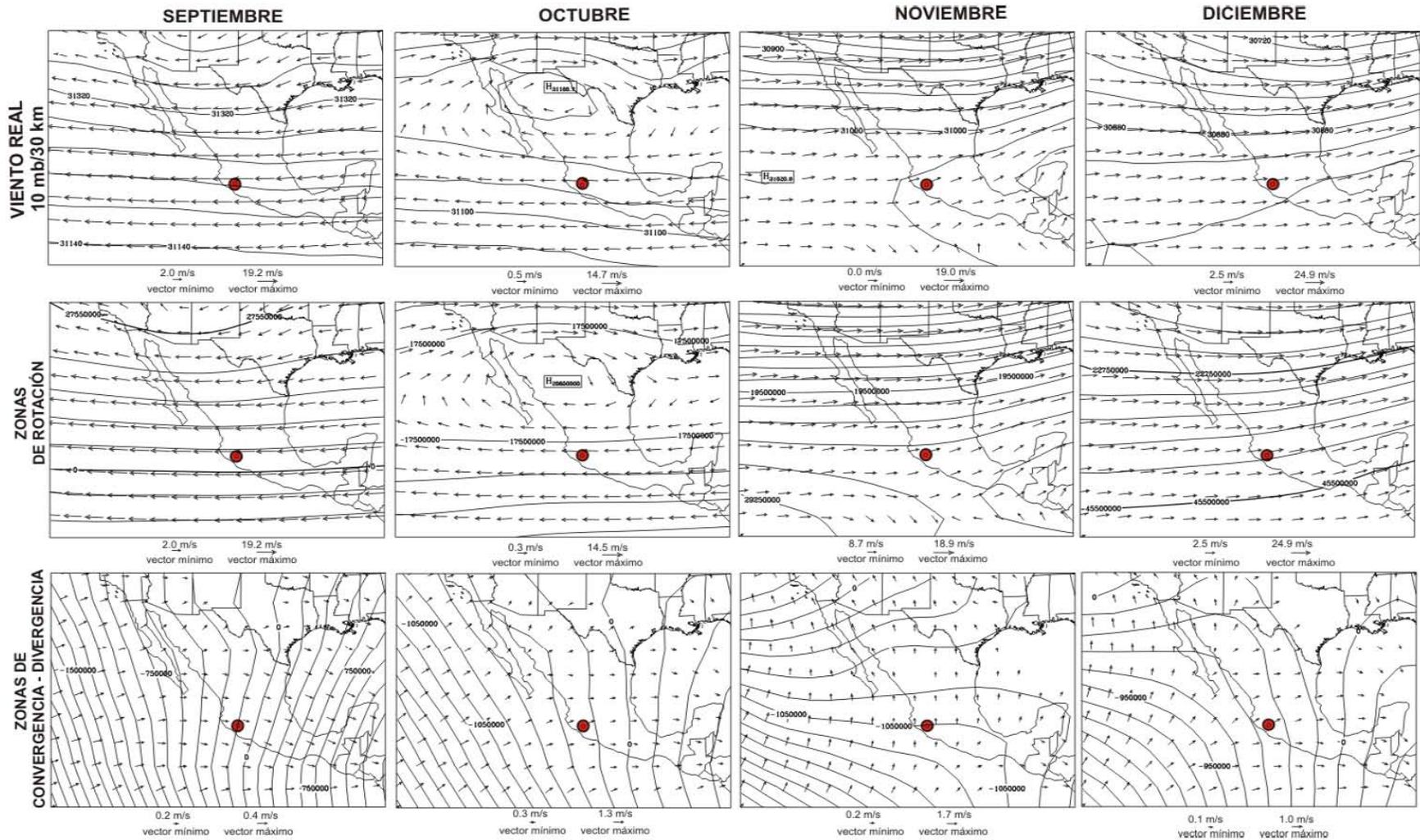


Figura 36. GRUPO V. Campo de viento horizontal de septiembre a diciembre en 10 mb. Septiembre y octubre presentan vientos del este en septiembre-octubre y vientos del oeste en noviembre-diciembre. se observa una circulación anticiclónica en octubre al norte de México.

RESEARCH ARTICLES

The ash-fall hazard from a Plinian eruption at Colima Volcano, MexicoRita Fonseca^{1,*} and Ana Lillian Martin Del Pozzo¹¹ Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Coyoacan Mexico D.F., Mexico**Article history**

Received November 15, 2010; accepted November 23, 2010.

Subject classification:

Volcanology, Volcanic risk, Ash-fall hazard, Colima Volcano, Mexico.

ABSTRACT

The historical eruptive activity at Colima Volcano has been characterized by Strombolian and Merapi type eruptions and Vulcanian explosions associated with dome growth, which have ended in a Plinian eruption about every 100 years. The situation now prevailing at Colima Volcano is similar to that which preceded these explosive eruptions, when a dome fills the crater. This study proposes seven scenarios for the ash-fall from a Plinian eruption, based on historical eruptive activity, isopach thickness from the 1913 Plinian eruption, land use, socioeconomic data, and a 15-year statistical wind study realized with daily radiosonde data grouped according to four altitudinal levels: 4,000-9,000 (I); 9,000-14,000 (II); 14,000-17,000 (III) and 17,000-28,000 (IV) m a.s.l., based on common wind speeds and directions. We have integrated the wind distribution at level IV and estimated the ash dispersion for a Plinian eruption. From January to March, the main impact would be towards the northeast, in April and in October, towards the east, in May, towards the north-northeast or north-northwest, from June to August, towards the northwest, in September, towards the west, and in November and December, towards the west-southwest. The fallout would damage the coniferous forests of the Colima National Park, two lagoons and three lakes. More than 30 million people living in Guadalajara, Mexico City, Leon and Colima would suffer eye, respiratory and skin problems. The proximal areas, such as Ciudad Guzman, would be subject to roof collapsing and communication problems. The agricultural and livestock sectors would suffer severe financial losses. The Queseria sugar mill, the Atenquique paper mill, and the cement plants in Zapotiltic would halt work due to chimney obstruction and machinery abrasion. Four thermoelectric plants, twenty airports and four commercial ports would be affected if the eruption occurs in summer.

1. Introduction

Colima Volcano (CV; 19°30'44" N; 103°37'02" W) is located in the western part of the Trans-Mexican Volcanic Belt at nearly 4,000 m above sea level (a.s.l.), and it is one of the most active volcanoes in Mexico (Figure 1). According to detailed historical analysis and field work, Plinian eruptions of CV have occurred on the order of once every 100 years. These have had significant impact on the surrounding areas because of widespread fall deposits, surges and pyroclastic

flows that destroyed farms, and caused roof collapses, forest fires, loss of livestock and crops, contamination of water resources, and morphological changes to the ravines and crater [Waitz 1932, Lugo et al. 1993, Martin Del Pozzo et al. 1995a, Saucedo 1997]. The last of these eruptions was characterized by an eruptive column over 23 km high, and it occurred in 1913, causing darkness in Ciudad Guzmán, Sayula and Guadalajara, which are located between 26 km and 140 km from CV [Arreola 1915, Saucedo et al. 2010]. The area covered by the ash at that time is now populated by more than 5 million people.

The present-day activity at CV is associated with dome growth and destruction of the crater, which has become more explosive after several decades of lava emission. These Vulcanian eruptions are similar to those that preceded the Plinian eruptions, suggesting the possibility of a Plinian phase in the near future, like those that occurred in 1818 and 1913. In this study, we identify and evaluate the areas that will be vulnerable to ash-fall in Plinian eruption scenarios, based on analyses of historical eruptive activity, isopach thickness from the 1913 eruption, a vertical wind study, and socioeconomic characteristics of the cities involved. Ash-fall would form secondary lahars by obstructing the steep ravines on CV, especially during the summer. Furthermore, the steep upper slope of the CV cone and its growth on the older Nevado de Colima and collapsed CV, represent unstable conditions for its southern flank [Lugo et al. 1993, Martin Del Pozzo et al. 1995a, Cortes et al. 2005].

2. Methodology

A detailed revision of historical and current documents regarding the volcanic activity of CV was carried out to evaluate its eruptive behaviour. Field work allowed us to identify the explosive deposits of the 1818 and 1913 eruptions and their distribution.

Considering the possibility of a new explosive event, a wind study was carried out, based on the 15-year radiosonde database (1990-2005) from the Manzanillo station of the

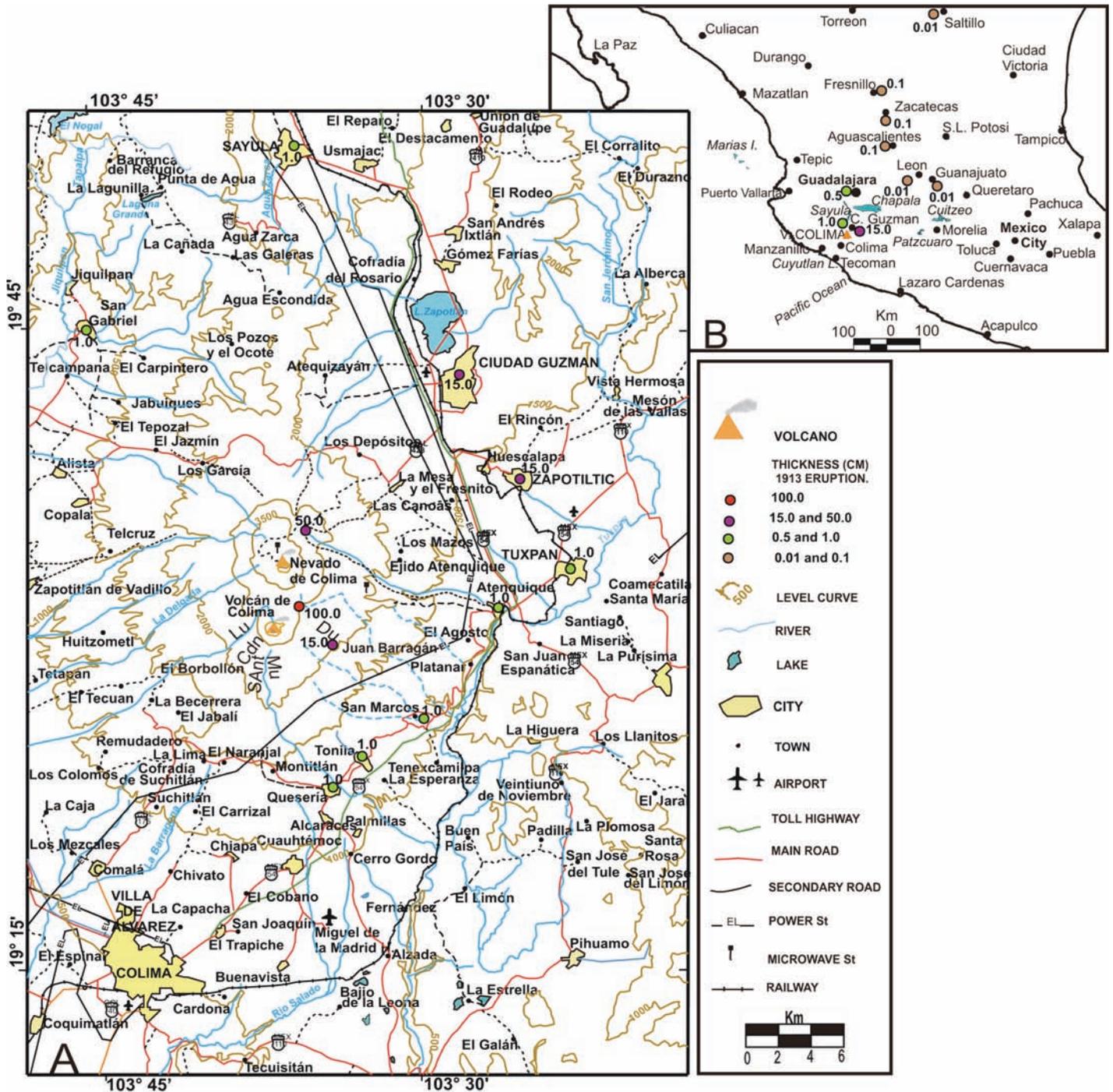


Figure 1. A: Map of the Colima Volcano and cities affected in 1913 by ash fall. Lu: La Lumbre; SAn: San Antonio; Mu: El Muerto; Du: Durazno; Cdn: Cordoban. B: Localitation of Volcano in Mexico.

National Meteorological Service (19°07' N, 103°33' W), and complemented with data from the Guadalajara station (20°39'57" N, 103°22'48" W). The statistical analysis was based on the daily radiosonde database, which has 15 pressure levels and includes wind direction (degrees), wind intensity (m/s) and altitude (m). The wind dataset was then organized into four altitudinal levels: I, 4,000-9,000; II, 9,000-14,000; III, 14,000-17,000; and IV, 17,000-28,000 m a.s.l. These were subdivided according to the variations in wind speed and direction. Levels I and II showed wind-speed variations of between 100 km/h and 150 km/h. For levels III and IV, the wind-speeds were 150 km/h. These data are also

consistent with the regional atmospheric circulation model [Fonseca et al. in preparation].

Scenarios for future Plinian eruptions with a height of 23 km were prepared for each month, by integration of historical and socioeconomic characteristics per city, field data of ash isopach distribution of the 1913 eruption, and dominant monthly wind vectors at 17,000-28,000 m a.s.l. These are all plotted on 1:250,000 and 1:1,000,000 scale maps. The socioeconomic data (population, economic activity, airport type, flights/year, roads, power stations) was based on the 2005 census [INEGI 2005] and the statistical yearbook [INEGI 2007].

3. Population and infrastructure

The CV region was the seat of pre-Colombian cultures that flourished in western Mexico, and the volcanic activity was not an obstacle for the socioeconomic development of the area.

In the 1913 eruption, more than 732,426 inhabitants were affected by ash-fall, while from 1913 to 2005, the population in the same area increased to more than 5 million people (Table 1). Ash also fell on Mexico City in 1818, which now has more than 20 million inhabitants. Other cities, like Guadalajara and Leon, had ash-falls in 1770 and 1913, and they now have more than 4 million and 1.3 million inhabitants, respectively.

The CV is a National Park, and it also includes agricultural land and ranches. Private environmental protection areas, such as El Borbollon, the Jabalí ranch, and the Hacienda San Antonio Hotel, are located from between 9 km and 12 km from CV. During the field work, we confirmed that the Borbollon and Jabalí ranches have sustainable management of natural resources and employ local people. Perception of the volcanic hazard has strengthened the communication between the people working in these locations and the authorities.

The permanent crops are mainly fruit, vegetables, cereals, sugar cane and agave, which have important roles in both the local and regional economies. Sugar cane is the main crop, which supplies the Queseria sugar mill that is located 15 km from CV. The El Borbollon ranch grows coffee, which is sold in the city of Colima. In San Marcos, 15 km from CV, there is a greenhouse that grows exotic flowers for export. Most of the population works in farming, trade, administration services, tourism and construction.

There are a total of 14 international airports in the cities of Aguascalientes, Guadalajara, Leon, Manzanillo, Mazatlán, México City, Morelia, Puebla, Puerto Vallarta, Querétaro, San Luis Potosí, Saltillo, Toluca and Zacatecas, all of which are within 725 km of CV, and are included in the area that experienced ash-fall in 1913 (Table 2). There are also six national airports in the cities of Zamora, Celaya, Colima, Tepic, Uruapan and Cuernavaca. Even with small eruptions, such as those in May 2001 and September 2005, the airport in the city of Colima was closed due to ash-fall. With larger events, the ash-fall would damage aeroplanes and power plants, and disrupt airports, causing short circuits in computers and burning out transformers [Guffanti et al. 2009]. Due to its abrasive nature, ash is hazardous to aeroplane electronic communication systems, turbines and fuselage [Casadevall 1992].

The main roads in the area have constant traffic, such as the Federal and Panamerican highways that connect Colima, Guadalajara and México City with northern Mexico. The thermoelectric plants in Manzanillo, Mazatlán, Acolman,

Ash fall thickness (cm)	Cities	Distance to crater (km)	Population	
			1913	2005
15	Ciudad Guzmán	26	17,085	93,609
	Zapotiltic	24	3,648	21,440
>1	Queseria	15	963	8,079
	Sayula	41	78,720	27,311
0.5	Tuxpan	25	4,472	26,134
	Atotonilco el Alto	160	6,027	26,044
	Aguascalientes	320	76,591	663,671
	Guadalajara	140	119,468	4,295,853
	Sahuayo	111	*	59,316
0.1	Tamazula	42	*	17,441
	Tizapan el Alto	93	1,922	13,755
	Arandas	185	5,911	46,099
	Barca, La	150	7,487	33,653
	Encarnación de Díaz	250	4,711	22,902
	Fresnillo	440	60,822	110,892
	Lagos de Moreno	257	12,243	92,716
	Teocaltiche	240	5,840	21,661
	Tepatitlán	185	5,560	82,975
	Yahualica	200	3,036	14,265
0.01	Ameca	122	9,529	35,047
	Guanajuato	312	66,933	70,798
	León	275	89,510	1,278,087
	Piedad, La	190	25,790	78,361
	Saltillo	720	25,414	633,667
	Zamora	145	97,994	127,606
	Zapotlanejo	145	2,750	30,162

Based on: Dirección General de Secretaría de Hacienda y Fomento de Estadística (1918) and INEGI (2005).

Table 1. Main cities affected by the 1913 eruption, and the populations in 1913 and 2005.

City	International Airport	Flights/year
Aguascalientes	Jesús Terán Pereda	11,506
Cuernavaca	Gral. Mariano Matamoros	no data
Durango	Gral. Guadalupe Victoria	15,676
Guadalajara	Miguel Hidalgo y Costilla	136,206
Leon	El Bajío	27,206
Manzanillo	Manzanillo	8,004
Mazatlán	Rafael Buelna	no data
Mexico City	Benito Juárez	355,593
Morelia	Francisco Mujica	18,144
Pachuca	Juan G. Villasana	no data
Puebla	Hermanos Serdán	17,277
Puerto Vallarta	Gustavo Díaz Ordaz	38,892
Querétaro	Querétaro	12,733
Saltillo	Ramos Arizpe	13,165
San Luis Potosí	Ponciano Arriaga	23,071
Toluca	Adolfo Lopez Mateos	no data
Victoria Ciudad	Gral. Pedro José Méndez	no data
Zacatecas	Gral. Leobardo C. Ruiz	8,257
City	National Airport	Flights/year
Celaya	Celaya	2,400
Colima	Miguel de la Madrid H	5,207
Tepic	Amado Nervo	10,837
Uruapan	Ignacio López Rayón	6,010
Zamora	Zamora	1,061

Table 2. List of cities with airports and number of flights per year (2006 data).

north of Mexico City, Salamanca, San Luis Potosí, Tepic and Tula are important sources of income, as are the petrochemical and refinery industries in Salamanca, Veracruz and Tepic. The power stations in Colima, Manzanillo and Guadalajara supply more 1.5 million consumers with electricity, and these might be affected in the future by a Plinian eruption.

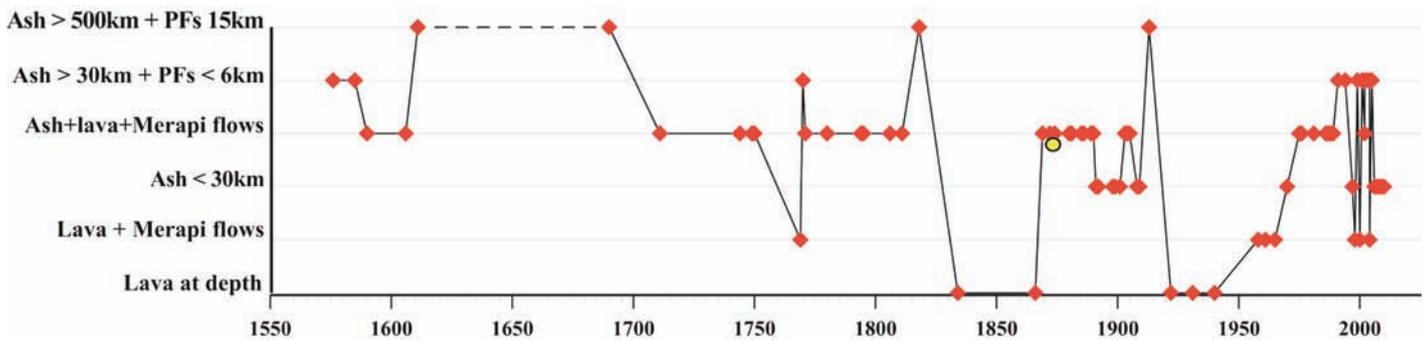


Figure 2. Colima Volcano historical activity. Based on: Tello 1651, Perez de Leon 1789, Mota Padilla 1742, Bárcena 1887, Puga 1889, Vizcarra 1891, Starr and Arreola 1903, Diaz 1906, Arreola 1915, Waitz 1932, Mooser 1961, Thorpe et al. 1977, Luhr and Carmichael 1982, Medina 1983, Flores 1987, Martin Del Pozzo and Romero 1988, De la Cruz 1993, Vizcaino 1993, Martin del Pozzo et al. 1995b, García-Acosta and Suárez 1996, Saucedo 1997, Breton et al. 2002, Reyes and De la Cruz 2002, Zobin et al. 2002, Navarro et al. 2003, Smithsonian Institution [1988, 1993, 2000], University of Colima Bulletin. ● : Lateral activity (Volcancito 1869-1873). Dashed line: no data.

4. Eruptive history

The 430-year historical records of CV show that it is a very active volcano, with a cyclic behaviour that ends in Vulcanian and Plinian eruptions approximately every 100 years. The first eruptive analyses were carried out by Bárcena [1887] and Starr and Arreola [1903], who reported that CV has effusive and explosive periods between resting intervals, and that the intensity and magnitude of the eruptions had increased with time. Waitz [1932] considered that CV has a cyclic behaviour, and later studies by Luhr and Carmichael [1982], Martin Del Pozzo and Romero [1988] and Robin et al. [1991] have also confirmed eruption cycles in the recent activity of CV. These studies have proposed four historic cycles, each of which began with slow lava ascent, continued intermittently with lava or pyroclastic eruptions, and ended in explosive eruptions with pyroclastic flows and extensive ash-fall, which clears the crater for a new cycle. Luhr and Carmichael [1990] associated compositional variations with the cycles, which have mostly involved basic andesitic magmas in the second and third cycles (1690-1818, 1818-1913), which ended in explosive eruptions. Luhr and Carmichael [1990] also considered that the 1913 eruption had more hydrous andesitic magma than that in 1818 (basic andesitic magma), because of the presence of hornblende.

We present here the results of a new historical analysis. Each cycle ends in a VEI 4 Plinian eruption (Figure 2). For decades, lava ascends until it reaches the crater and a dome is formed. Afterwards, Merapi flows and hot avalanche deposits are generated by lava flow gravitational collapse, or from dome growth on a steep slope. The Vulcanian eruptions grow stronger and more frequent, producing ash-fall and pyroclastic flows, and a new Plinian eruption eventually expels the dome, producing ash-fall up to distances of more than 700 km from CV, and forming block and ash flows up to 15 km away [Saucedo et al. 2010].

Cycle I (?-1611)

Early records refer to eruptions with tephra and pyroclastic flows (Figure 2). An eruption in 1576 involved

ash-fall and pyroclastic flows and coincided with the death of many young people, although these deaths might have been associated with an epidemic that broke out in the same year and that killed more than half of the populations of 22 villages in Colima [Tello 1651, Perez de Leon 1789]. The following eruptions in 1585, 1587, 1589, 1590, 1602, 1606 and 1611 produced important lapilli, scoria and ash-falls, but the main impact of the stronger eruptions in 1576 and 1611 was on livestock and agriculture, in addition to the constant fear of the population [Tello 1651, Mota Padilla 1742, Bárcena 1887, Ciudad del Real 1976, Breton et al. 2002].

Cycle II (1611-1690)

Another eruption in 1623 was attributed to CV, but information regarding this event is limited, and therefore the characteristics of the eruption are not known [Tello 1651, Vizcarra 1891]. It was not until 1690 that another explosive eruption was reported, of a Pelean type, with strong seismic activity [Medina 1983]. Martin Del Pozzo and Romero [1988] considered this as the end of the second cycle.

Cycle III (1690-1818)

CV produced ash in 1744, 1749 and 1750, which fell on the city of Colima [Barcena 1887, Arreola 1915]. In 1769, lava flows were reported, and in 1770 there was an explosion that was preceded by tremors and loud noises, and which formed a dense ash column and pyroclastic flows. Ash fell on Guadalajara for 3 days, and the pyroclastic flows filled the La Joya ravine on the southwest, covering plants, cattle, birds and other animals [Perez de Leon 1789]. The ash-fall resulted in darkness in the surrounding areas, which reached the city of Durango, 550 km north of CV [Perez de Leon 1789]. Due to the extent of the ash-fall and the 3-hour duration of the eruption, it appears to have been a VEI 3 event. CV continued to be active in 1771, 1780 and 1794-1795. Lava flows, rockslides, ash emission, and fumarolic activity were recorded in 1804, 1806 to 1809, and 1811 [Barcena 1887, Arreola 1915].

At the beginning of 1818, the crater was filled by a

dome, and on February 15, 1818, it was destroyed by an eruption that started with an explosion that was heard in the cities of Ciudad Guzman and Leon, 26 km and 275 km from CV, respectively [Waitz 1932]. The tephra cloud «covered the moon» and produced darkness [Arreola 1915, Waitz 1932]; a loud noise was heard two hours later (22:00 hours). The pyroclastic flows coming down the Muerto ravine on the southern side of the volcano were seen by the inhabitants of San Marcos. These flows destroyed the forests and killed cattle, while lapilli and ash fell to the east-northeast, mostly between 20:00 and 22:00 hours [Arreola 1915, Waitz 1932]. The ash caused damage to the roofs of the houses in Ciudad Guzman, and some collapsed because of the weight. Distal ash arrived as far as Guadalajara (140 km), Leon (275 km), Guanajuato (310 km), Zacatecas (384 km), San Luis Potosi (425 km), Querétaro (345 km) and Mexico City (470 km). This 1818 eruption, which left an irregular funnel-shaped crater, was short and was followed by steam emissions and some earthquakes in later years [Vizcarra 1891, Waitz 1932].

Cycle IV (1818-1913)

Lava ascended from a depth of 300 m to 200 m between 1834 and 1866, and in 1869, a lateral dome known as "Volcancito" was formed on the upper north-eastern side of the volcano, activity that continued until 1873 [Barcena 1887]. In 1869, a tremor was felt in San Marcos and San Gabriel, which preceded lava flows, ballistics and ash emission, and which scared the population [Arreola 1915]. Fumarolic activity with sporadic ash emission and underground noises were reported from the central crater in 1869, 1872 to 1874, 1877 and 1879 [Barcena 1887, Arreola 1915, García-Acosta and Suárez 1996].

At the end of 1880, a central dome overflowed the crater edge, which produced several lava flows, as well as ash emission, in 1880-1881, 1885-1886, and 1889-1890 [Arreola 1915, Waitz 1932]. The crater was then filled again by a summit dome, but explosions in 1903 and 1908 produced pits in this [Starr and Arreola 1903, Diaz 1906, Waitz 1932].

The 1913 eruption began with loud noises and thunder, between January 17 and 18, forcing the people 7 km to the east of the volcano to abandon their farms on the higher parts of CV and to take refuge on the plateau, which is today Juan Barragan [Waitz 1932]. On January 18, ash-fall and constant noise were reported; the 1880 dome was totally destroyed on January 20. At dawn on January 20, a series of explosions formed dense ash columns that were accompanied by loud noise, which lasted from 15:00 to 16:00 hours. After 16:00 hours, surges and block and ash flows descended ~15 km from the crater, which filled the ravines by up to 40 m [Waitz 1932]. The flows caused fires and killed cattle. These flows were remobilized as hot lahars during the rainy season several months later, killing eight people and a lot of cattle [Waitz 1932, Saucedo 1997]. Ash fell to the north-

northeast as far as 725 km from CV [Waitz 1932]. The 10-15-cm-thick ash and pumice fall in Ciudad Guzman caused roof collapses, and 0.5 cm of ash fell on Guadalajara, and 0.01 cm on Zacatecas, Aguascalientes and Saltillo [Waitz 1932]. The 1913 eruption left a 400-m-diameter crater with irregular peaks on the edges [Waitz 1932].

During the 1913 eruption, the main direction of the ash plume was to the north-northeast, although people in the city of Colima 30 km to the south also mentioned darkness and that their candles blew out due to the ash in the air [Navarro, personal communication].

Cycle V (1913-?)

Lava was observed at a depth of 50 m in the crater in 1922, while in 1940, it had ascended nearly to summit level [Waitz 1932, Mooser 1961]. In 1957, loud noises were heard, followed by steam emission, which scared the local population. After 1958, the dome grew by 70 m in one year [Mooser 1961, Vizcaino 1993]. Between 1961-1962 andesitic lava flows from the dome advanced 20 cm/d, reaching 1 km to the north, northeast and northwest of the crater [Mooser 1961]. In 1970, noises and local seismicity preceded small ash emissions [Vizcaino 1993]. Between 1975 and 1976, the volcano produced local ash-fall, two lava flows >3.5 km long and 50 m thick, and block and ash flows 4.5 km long that caused fires on the south-eastern part of CV [Thorpe et al. 1977].

During 1981, there was fumarolic activity and ash-fall in the summit area, and in early 1982, lava flowed 1 km south-westward. In 1986, an ash cloud was seen from the city of Colima, and in 1987, an explosion produced a pit of 100 m to 150 m in diameter and 30 m to 40 m deep on the upper eastern flank of CV [Flores 1987]. In 1988, fumarolic activity alternated with small explosions.

After increasing fumarolic and seismic activity and rockslides from the dome in 1991, a small new dome grew through the summit dome. Its growth caused partial collapse of the summit dome to the south, which produced pyroclastic flows and was followed by lava advance [Rodríguez-Elizarrarása et al. 1991, Gonzalez et al. 1993]. This dome was destroyed by an explosion in 1994, which produced a crater 135 m in diameter and 40 m deep [Reyes and De la Cruz 2002]. The eruption also produced ash-fall 15 km to the west, impact craters up to 2 km from the crater, and pyroclastic flows over 4 km long [Saucedo 1997].

During 1997, the seismic crises and rockslides from the dome decreased after explosions [Martin Del Pozzo et al. 2002], but in November 1998, the seismicity and rockslides increased, which ended with lava extrusion from the dome. On November 18, 1998, growth of a new dome and an increase in seismicity caused the authorities to evacuate the population of La Yerbabuena and Juan Barragan, 10 km and 7 km from the crater. On November 21, 1998, new lava flow

was accompanied by Merapi flows; lava continued flowing until the end of November, when collapse of the lava front formed block and ash flows that reached 4.8 km in the Cordoban ravine [Navarro et al. 2002, Saucedo et al. 2002].

In February 1999, the seismicity increased, and it ended with an explosion that destroyed part of the new dome. The noise was heard in Ciudad Guzman and Colima, while the ash column that was 3 km to 4 km high moved to the east and south of the volcano [Breton et al. 2002]. Ballistics reached between 3.5 km and 4 km on the north and northeast, which formed impact craters that were more than 2 m in diameter. The activity continued, and on May 10, 1999, another explosion was heard in Colima, which formed an ash column 6.5 km high and pyroclastic flows down La Lumbre and El Cordoban, and produced ballistics up to 4.5 km away that caused fires on the upper parts of CV. On July 17, 1999, after 13 hours of seismicity, an eruption formed a 10-km-high ash plume that produced ash-fall on Zapotitlan de Vadillo, 21 km west of CV; block and ash flows ran down the ravines 3.3 km towards the south and southwest, which buried the vegetation and covered the 1998 lava flow [Saucedo et al. 2002, Macias et al. 2006]. The explosion produced a crater with a diameter of 230 m and a depth of 70 m to 80 m. On July 18, 1999, the pyroclastic flows were remobilized as hot lahars, which followed the same south-southwest path [Breton et al. 2002]. Small explosions and low seismicity continued for several months [Breton et al. 2002].

During 2000, lava flowed down the Beltran, Durazno and Cafecito ravines on the southeast side of the volcano, with accompanying Merapi flows. During the rainy season, these were remobilized as lahars, and they damaged the bridge over the state highway, which isolated the communities of San Jose del Carmen and La Becerrera [<http://www.ucol.mx>]. In 2001, another eruption produced block and ash flows towards the southwest, and ash-fall on San Marcos and Tonila, as well as new impact craters to the north of CV [GVN 2001]. During May 2001, the formation of a new dome was reported, and a spine on the dome was observed in December 2001 [GVN 2001]. In January 2002, the dome growth continued. In February 2002, lava flowed southwards, followed by pyroclastic flows [Smithsonian Institution 2000]. From March to May 2002, there was frequent sliding from the front of the lava flows, so the authorities evacuated several towns to the southwest and southeast of CV from May 18 to June 3, 2002. Lava extrusion continued until February 2003, and in July and August 2003, eruptions produced block and ash flows and 3-km-high ash plumes that travelled to the southwest and northwest, and ash fell on the town of El Grullo at ~60 km to the northwest of CV [Smithsonian Institution 2003]. The eruption was noisy due to rocks tumbling down the slopes. There were several small ash emissions until December 2003, when an eruption produced ash-fall in Ciudad

Guzmán, and ballistics [Smithsonian Institution 2003]. In September 2004, a dome started growing, which produced 2-km-long block and ash flows, followed by lava flows to the north and west-northwest that reached 1.8 km and 0.6 km in October 2004 [<http://www.ucol.mx>]. During 2005, eight pyroclastic flows with ash plumes from 2 km to 8.5 km above the crater were produced by Vulcanian eruptions. In September 2005, pyroclastic flows were remobilized as lahars, which reached the power lines in Montegrande. The explosions decreased in 2006, although vapour emissions and small ash columns were still produced [G. Reyes, personal communication].

Since February 2007, a new dome has started to grow, and this now exceeds the crater rim. Dome growth still continues, with small emissions [<http://www.colima-estado.gob.mx/seguridad>]. Given the recurrence interval of Plinian events and the similarities between the present activity and the activity that preceded the 1818 and 1913 eruptions, it has become necessary to evaluate the distribution, thickness and effects that the ash would have in the future.

5. Wind distribution

The dispersion of volcanic ash is controlled mainly by wind transport, and meteorological data of wind direction and speed have been used to identify the patterns of tephra dispersal at Etna [Andronico et al. 2005], Popocatepetl [Delgado 2001, Martin Del Pozzo et al. 2008], CV [Navarro et al. 2003], Auckland Volcanic Field [Houghton et al. 2006] and Nevado de Toluca [Aceves et al. 2007], among others.

In the present study, we proposed a detailed wind study per month because Plinian eruption plumes can encounter large variations in horizontal wind speeds. At CV, the vertical wind distribution was divided in four altitudinal levels that were based on wind direction and speed. The wind data was grouped as January to March, June to August, and November and December, because of similar directions, and data from April, May, September and October were included.

The dominant wind direction at level I (4,000-9,000 m a.s.l.) is westerly-south-westerly from January to May and from November to December. At this level, from June to September, easterly winds prevail, while during October, the trade winds are very unstable, so the wind can blow in any direction, with a maximum speed of 100 km/h. Figure 3 shows the wind directions for each level according to the month of the year.

At level II (9,000-14,000 m a.s.l.), the dominant wind direction is westerly-south-westerly from January to March and from October to December. In April and May, the dominant wind is westerly, while from June to September, the wind direction is variable. At level II, the greatest wind velocity is 150 km/h from January to May, and 100 km/h from June to December.

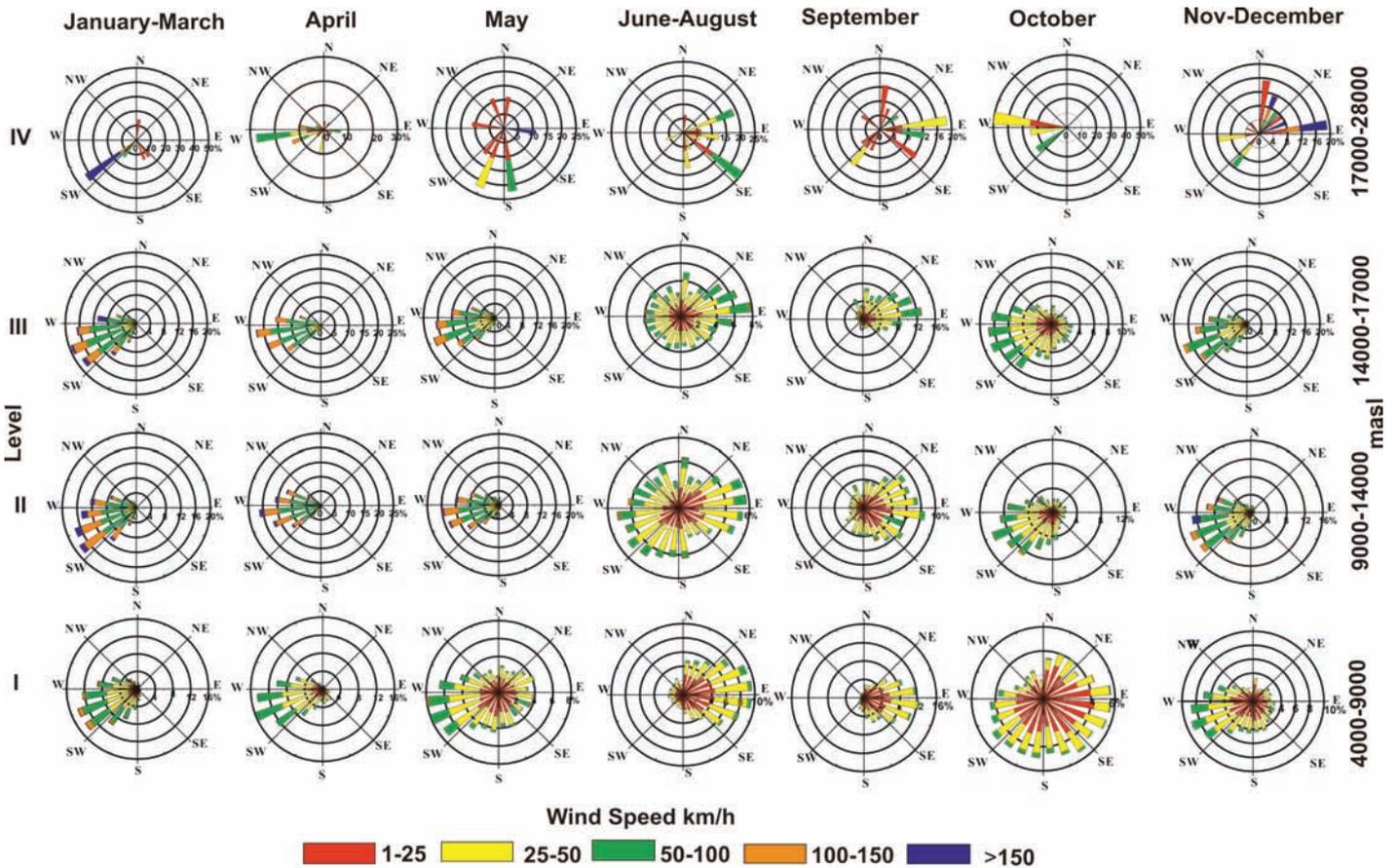


Figure 3. Monthly wind directions for altitudinal levels, based on radiosonde data (1990-2005) from the Manzanillo Station. Wind direction frequency diagrams showing average percentage of time that winds blow towards sectors centered on 4 sectors.

The winds at level III (14,000-17,000 m a.s.l.) are similar to those at level II: the dominant winds are west-south-westerly from January to May and from October to December, while there are easterly winds with secondary directions from June to September. At this level, the maximum wind speed is more than 150 km/h from January to May and in November and December, and 100 km/h from June to October.

At level IV (17,000-28,000 m a.s.l.), the wind data was divided into six groups according to similar wind directions in several months: January to March; April and October; May; June to August; September; and November and December. At this level, south-westerly winds prevail from January to March, and westerly in April and October. During May, south-south-westerly and south-south-easterly winds dominate, from June to August, south-easterly winds prevail, while in September and in November and December, the easterly winds fluctuate. The maximum wind speed is 150 km/h from January to March and in November and December, with 100 km/h from April to August, and 50 km/h in September and October. This level is associated with the very fast winds (the jet stream).

In a Plinian eruption, ash plumes can reach the stratosphere (between 16 km and 30 km high), which would allow for higher and wider ash dispersion. The Plinian column height in the 1913 eruption was estimated at 23 km

[Saucedo et al. 2010]. Here we have thus integrated the wind distribution at level IV (from 17,000-28,000 m a.s.l.) and estimated the ash dispersion for a similar event to that of 1913. The dominant wind course, as the greatest frequency per month, for level IV was used to establish the scenarios that would result from a Plinian eruption.

6. Ash-fall scenarios

Many theoretical and experimental models have been developed from the buoyant plume theory, as modified for volcanic eruptions [Wilson et al. 1978, Carey and Sparks 1986]. Similarly, many studies have applied semi-analytical and numerical models for the transport and deposition of volcanic ash based on vulcanological parameters, such as: total mass, column height, column shape coefficient, grain size, mass eruption rate, and daily wind profile per season [Folch and Felpeto 2005, Macedonio et al. 2008, Costa et al. 2009, Selva et al. 2010]. These studies have proposed hazard maps for ash-fall at Vesuvius and Campi Flegrei. The 1913 CV eruption was shorter than the 1979 Vesuvius eruption, although the column height and mass was similar (Table 3). The scenario constructions for CV are here based on ash-fall depths, and take into account the isopach thickness from the 1913 Plinian eruption (Table 4), the dominant wind direction, the total number of people, and the main economic activities, land use and communications infrastructures.

Volcano	Eruption Date	Total mass (kg)	Volume (km ³)	Column Height (km)	Duration (h)	References
Vesuvius, Italy	79 AD	2x10 ¹²		27	18	Sigurdsson et al. 1985 Pfeiffer et al. 2005 Macedonio et al. 2008
Colima, Mexico	1913-01-20	1.5x10 ¹²	1.4	23	4.6	Saucedo et al. 2010 Carey and Sigurdsson, 1989
St. Helens, US	1980-05-18		0.3	19	9.1	Carey et al. 2010
Campi Flegrei, Italy (Agnano Monte Spina)	4.1 Ka	5.2x10 ¹¹	0.11	26		De Vita et al. 1999 Costa et al. 2009

Table 3. Main parameters of the 1913 eruption as compared to other Plinian eruptions.

Scenario 1

From January to March, the dominant wind direction is towards the northeast (Figure 4).

100 cm

More than 100 cm of tephra would cover areas up to a distance of 3 km (Figure 4). The Playon area on the northern part of CV and the north-eastern slope of the Nevado de Colima would be covered by ash and pumice. Mature pines would survive, as occurred in 1913, although their branches would break off due to the weight of the ash, and the small pine trees and holm oaks in the area would be buried. Many wild animals, such as pumas, mountain cats, ocelots and deer, and many types of birds, like hawks and humming birds, all of which are endangered species, would die. The thick ash-fall would also kill insects and reptiles. Ash abrasion on the insect epicuticular wax layer causes rapid desiccation and death [Cook et al. 1981]. Fires caused by ballistics would burn off the vegetation. The seismic station to the north of the crater would be destroyed.

50 cm

From 50 cm to 100 cm of ash would be expected between 3 km and 11 km from the crater on the north-eastern quadrant of the Nevado de Colima National Park. This zone is covered by coniferous forests with natural grasslands, and it is a popular camping site. The ash would bury small trees and grass, and break off tree branches. The wild animals, and especially birds, would die. The seismic and visual monitoring equipment at the Nevado Volcano,

which is 5.3 km from the CV crater, and the radio and television microwave station on the northern flank of the Nevado Volcano would be destroyed.

15 cm

With 15 cm to 50 cm of ash, lapilli and pumice fall, areas northeast of CV, between 11 km and 38 km from the CV crater would be affected (Table 5). In this area, there are more than 100,000 inhabitants who would be subject to stress and corneal abrasion, as well as irritation of the eyes, skin, nose, scalp and respiratory system, due to the ash [Horwell and Baxter 2006, Nieto et al. 2007]. Agriculture, cattle ranching, and trade and tourism would be affected (Table 5). The ash-fall would bury crops and cause defoliation of fruit trees, which would result in seasonal crop loss and a higher percentage of deformed fruit. Livestock would get sick and/or die after consuming contaminated grass and water. It would be difficult for the animals to find food and water sources. In the 1818 and 1913 eruptions of CV, ash also caused roof collapses, while in Ciudad Guzman, several cows died after drinking polluted water and eating on pastures with ash [Waitz 1932].

The Juan Barragan and Ejido Atenquique springs supply drinking water to local people. Water ducts and pumps would be affected by ash abrasion, and the system would get blocked or destroyed, as happened in Ciudad Guzman in the 1913 eruption. There are radio and television microwave stations on the north-eastern flank of CV, power substations in Ciudad Guzman, and power lines that supply electricity to the Guadalajara metropolitan area. The ash would cause transmission problems, due to interference and cable and plate abrasion. The alarm system for lahars in Juan Barragan and Atenquique would be damaged too.

The unpaved roads that lead to Juan Barragan and Ejido Atenquique would be blocked by ash and fallen trees, and the main roads (Colima-Guadalajara) would also be paralyzed due to blockage, lack of visibility, and damage to the oil, fuel and air filters of vehicles. This would limit the effective response of the emergency services. The 1770, 1818 and 1913 eruptions caused darkness in the area, and in the May 18, 1980, eruption of Mount St. Helens, many thousands of kilometers of country roads, municipal streets and irrigation district service roads were closed for weeks [Schuster 1982].

Isopach Thickness (cm)	Distance from the Volcano (km)	Area (km ²)
100.00	3	4.24
50.00	11	15.46
15.00	38	382
<1.00	64	3643.78
0.50	160	8717
0.10	390	102,915.880
0.01	725	191,318.00

.Saucedo et al. 2010; Fonseca 2003. See figure 1

Table 4. Depth ranges of the ash-fall of the 1913 Plinian eruption.

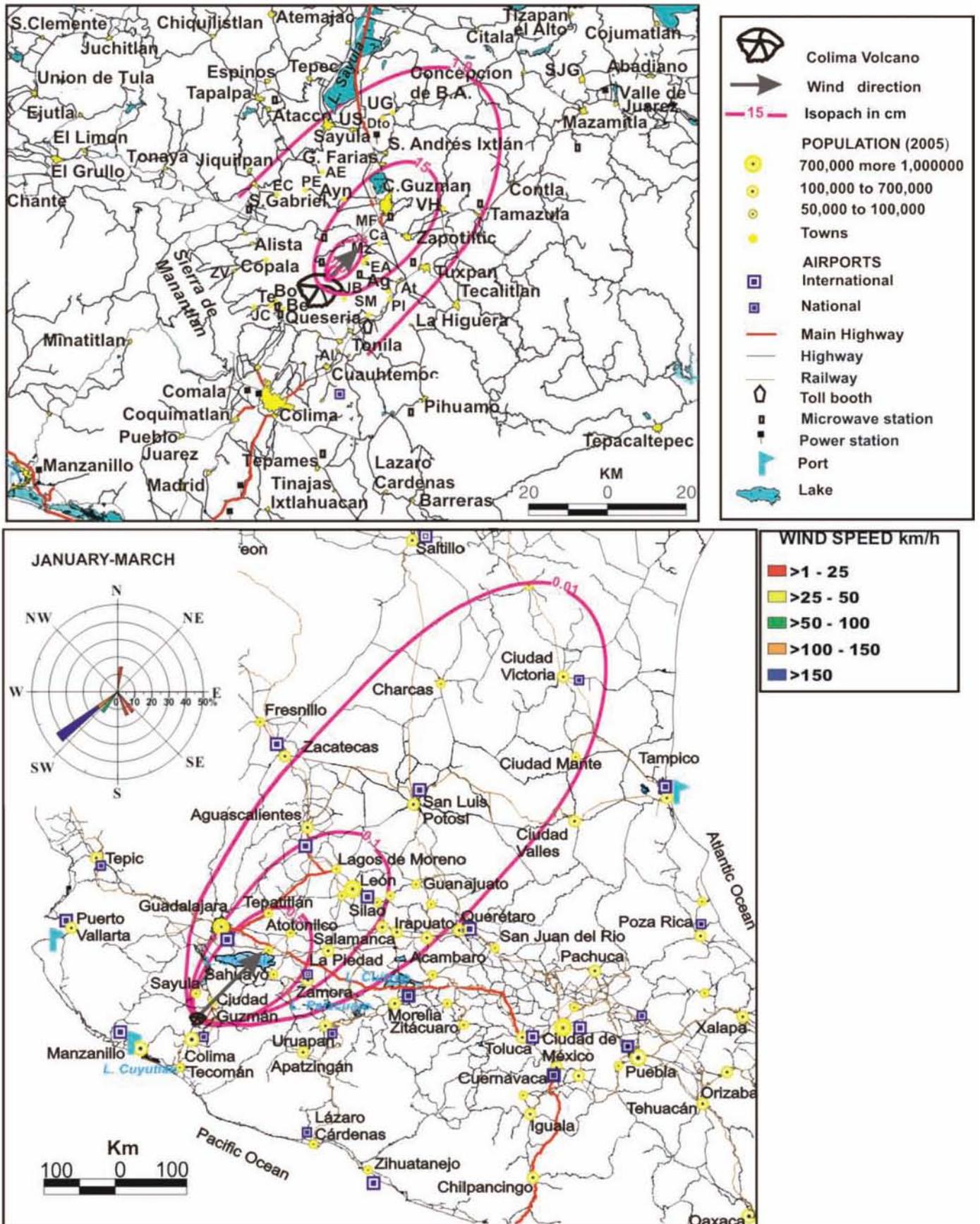


Figure 4. Scenario 1. For an eruption from January to March, showing the northeast area that would be affected by a future Plinian eruption. Two scales shown according to isopach contours: top, >1 cm; bottom, 0.01 cm to 0.5 cm. The maps show the main cities, populations and airports. Towns: (Pl) El Platanar; (Bo) El Borbollon; (Be) La Becerrera; (JB) Juan Barragan; (Ag) El Agosto; (Ma) San Marcos; (Te) El Tecuan; (At) Atenquique; (EA) Ejido Atenquique; (Mz) Los Mazos; (Ca) Las Canoas; (MF) La Mesa y el Fresno; (Al) Alcaraces; (ZV) Zapotitlán de Vadillo; (Dto) El Destacamento; (PE) Los Pozos y el Ocote; (VH) Vista Hermosa; (SJG) San José de Gracia; (LB) Loma Blanca; (AE) Agua Escondida; (EC) El Carpintero; (Ayn) Atequizayán; (US) Usmajac. Inset: wind diagram showing frequency in percentage and wind speed in km/h.

Ash thickness (cm)	Localities	Population (2005)	Main economic Activities in each isopach unit	Main Roads
15	Las Canoas	140	Farming: peach, pomegranate	Colima-Guadalajara
	Ciudad Guzman	93,609	guava, agave, sugar cane, corn	
	Ejido Atenquique	100	pigs and poultry	
	Juan Barragan	60	Cattle ranching	
	La Mesa y El Fresnito	900	Trade	
	Los Mazos	90	Tourism	
>1.0	Zapotiltic	21,440	Industry: cement	Colima-Guadalajara Tuxpan-Mazamitla
	Atenquique	849	Farming: sugar cane, corn	
	Queseria	8,079	vegetables, legumes, coffee, lemon,	
	San Gabriel	4,190	forage grass, pigs and poultry	
	San Marcos	3,179	Ranching: cattle	
	Sayula	27,311	Industry: lumber and paper	
	Tamazula	17,441		
Tonila	3,099			
0.5	Tuxpan	26,134		Colima-Guadalajara León-Morelia-Mexico
	Guadalajara	4,295,853	Industry: food, pharmaceutical	
	Atotonilco el Alto Ponciltlan	26,044 13,105	electronics, shoe, textile and lumber Tourism Trade Farming: corn, vegetables, sugar cane, pigs, goat and poultry Ranching: cattle, horse and sheep	
0.1	Leon	1,278,087	Industry: Shoe, leather and	Panamerican highway
	Zamora	127,606	and petrochemical	
	Lagos de Moreno	92,712	Trade Farming: corn, vegetables, sugar cane, pigs, goat and poultry Ranching: cattle, horse and sheep	
0.01	San Luis Potosí	685,934	Industry: shoe, leather and	Panamerican highway
	Aguascalientes	663,671	petrochemical	
	Irapuato	342,561	Trade	
	Celaya	310,413	Tourism	
	Ciudad Victoria	278,455	Farming: corn, vegetables, pigs	
	Salamanca	223,623	goat and poultry	
	Ciudad Mante	112,061	Ranching: cattle, horse and sheep	
	Guanajuato	70,798		
Charcas	20,173			

Table 5. Scenario 1. Localities, populations, main economic activities and roads which would be affected by different ash-fall levels during an eruption occurring from January to March.

The Zapotlan Lagoon is located 30 km northeast of CV. This is a wetland of international importance, where the aquatic plants, migratory birds, insects and fish would be at risk. The ash would cause changes in the water pH and a decreasing food supply; some fish are very susceptible to water changes and would die or get scale disease.

>1 cm

From 1 cm to 15 cm of ash would be expected between 38 km and 64 km from CV. There are 70,000 people who live in this area. The ash would cause eye, skin and nasal irritation, and respiratory problems. Farming and cattle ranching would also be affected. Crops would be destroyed by being buried, and even more mature plants would suffer severely from the ash. Cattle would get sick or die through ingestion of contaminated pastures and water. Ash-fall would damage chimneys and roofs of the sugar mill in Queseria and the paper mill in Atenquique.

The Colima-Guadalajara and Tuxpan-Mazamitla highways have constant traffic, which would be affected by

lack of visibility and ash accumulation, which would produce traffic jams for hours, or even for several days. The power stations in Sayula and Tamazula supply electricity to the region. Lightning and ash abrasion would damage the fuses in substations and would cause power shortages and blackouts.

0.5 cm

From 0.5 cm to 1 cm of ash-fall would be expected between 64 km and 160 km from CV. This area includes the more than 4 million people who live in the metropolitan area of Guadalajara and in small towns (Table 5). The effects in the future would be greater than in 1913 because of the higher population density. The roofs would have to be cleaned due to ash, and economic activities would be affected temporarily by lack of services and road access (Table 5). Corn and vegetable crops in the early stages of growth would be damaged by the ash, and livestock would get sick by eating pasture with ash.

Guadalajara is the second largest city in Mexico and has

one of the busiest international airports, which handles 136,000 flights/year. The ash cloud would force the airport to close operations for hours or days, and would result in the deviation of air routes. The ash accumulation on airport runways, taxiways and aprons would need to be cleaned. In 1990, the ash from the Redoubt Volcano (Alaska) remained in the atmosphere and in the flight paths of many aeroplanes, which caused the Anchorage Kenai Airport, located 80 km from the volcano, to remain closed for several days [Casadevall 1994].

The main highways in the Colima area connect important cities, such as Guadalajara, Manzanillo, Ciudad Guzman, León, Morelia and Mexico City. The lack of visibility due to ash-fall would cause problems with traffic. The power stations in Guadalajara and Atotonilco supply electricity to over one million users. The towers and cables would be damaged by ash, causing power shortages and blackouts or power interruptions to homes, industries, shops and administrative services for hours or days. The alarm system for lahars in San Marcos would be damaged.

Chapala is the largest lake in Mexico, and it is a habitat for several species of migratory birds, such as the white pelican, as well as native plants and animals. This region has conservation programs to maintain the natural habitats of the lake, but ash-fall would produce serious contamination of the lake and modify the pH and nutrient conditions. Ash-fall would also hinder the flight of birds.

0.1 cm

From 0.1 cm to 0.5 cm of ash would be expected between 160 km and 390 km from the CV crater. In this area, there are more than 1 million inhabitants. There would be respiratory problems because of the ash, although the effects on industry and trade would be minimal. The ash would have positive effects on some agricultural areas, because small amounts can act as natural fertilizers, but with cattle it would cause diarrhea and weight loss, and reduced meat and milk production [Fonseca et al. 2007].

The city of Leon has an international airport with 27,206 flights/year. The ash would force the airport to interrupt operations for hours due to ash in the air routes. In this area, the Panamerican highway that connects México City, Morelia, Querétaro, Irapuato and León would be affected. The main problem with the ash would be the traffic towards Guadalajara. The power stations in Leon and in Zamora would suffer damage to the transformers, which would cause blackouts.

0.01 cm

With 0.01 cm to 0.1 cm of ash-fall, this would reach between 390 km and 725 km from CV. In this area, there are more than 2 million inhabitants. The ash would have minimal effects on the economy of the area, because it

would be incorporated into the soil in days, or even be carried away by the wind (Table 5).

The thermoelectric power stations in Salamanca and San Luis Potosi are important sources of income, as are the petrochemical and refinery industries in Salamanca. The ash would increase the pollution in the environment and cause skin and eye irritation as well as respiratory problems in the population.

The airports in Aguascalientes, San Luis Potosí and Ciudad Victoria handle between 11,506 and 23,071 international flights/year, while the airport in Celaya has 2,400 national flights/year. Fine ash would lead to flight cancellations due to ash in the air. The effects on the Panamerican highway and the power stations in San Luis Potosi and Saltillo would be minimal.

Scenario 2

The wind direction in April and October is eastwards (Figure 5). The area that would be affected is similar to that of the 1818 eruption, when ash fell in Ciudad Guzman, Guadalajara, Lagos de Moreno, Leon, Guanajuato, Zacatecas, San Luis Potosi, Querétaro and Mexico City [Arreola 1915, Waitz 1932].

100 cm

The coniferous forest (Mexican fir oyamel, cedar and pine) on the eastern flank of the Nevado de Colima would be covered by more than 100 cm of ash, lapilli and pumice, as in scenario 1, and similar effects could be expected. Some mature trees could survive, but the small trees would be buried. Some animals would die due to asphyxia or desiccation. The fires caused by ballistics would burn off the vegetation.

50 cm

In the areas where 50 cm to 100 cm of ash would fall, the distribution would be similar to the 50 cm isopach in scenario 1. The area is covered by coniferous forests with natural grasslands, which would be buried by ash, and the wildlife would die.

15 cm

From 15 cm to 50 cm of ash, lapilli and pumice would affect eastern areas between 11 km and 38 km from the CV crater. Over 20,000 people live in this area, mainly in small communities (Table 6). Effects similar to those of scenario 1 (15 cm) would be expected. The ash would also cause roof collapses. The vegetables and agave crops would be buried (Table 6). Livestock would get sick and/or die, and it would cause a decline in meat, egg and milk production.

The Atenquique paper mill would be affected significantly by ash-fall, causing a decrease in the production of cellulose. Raw materials stored out in the open, as well as the chimneys and roofs, would be damaged by ash-fall.

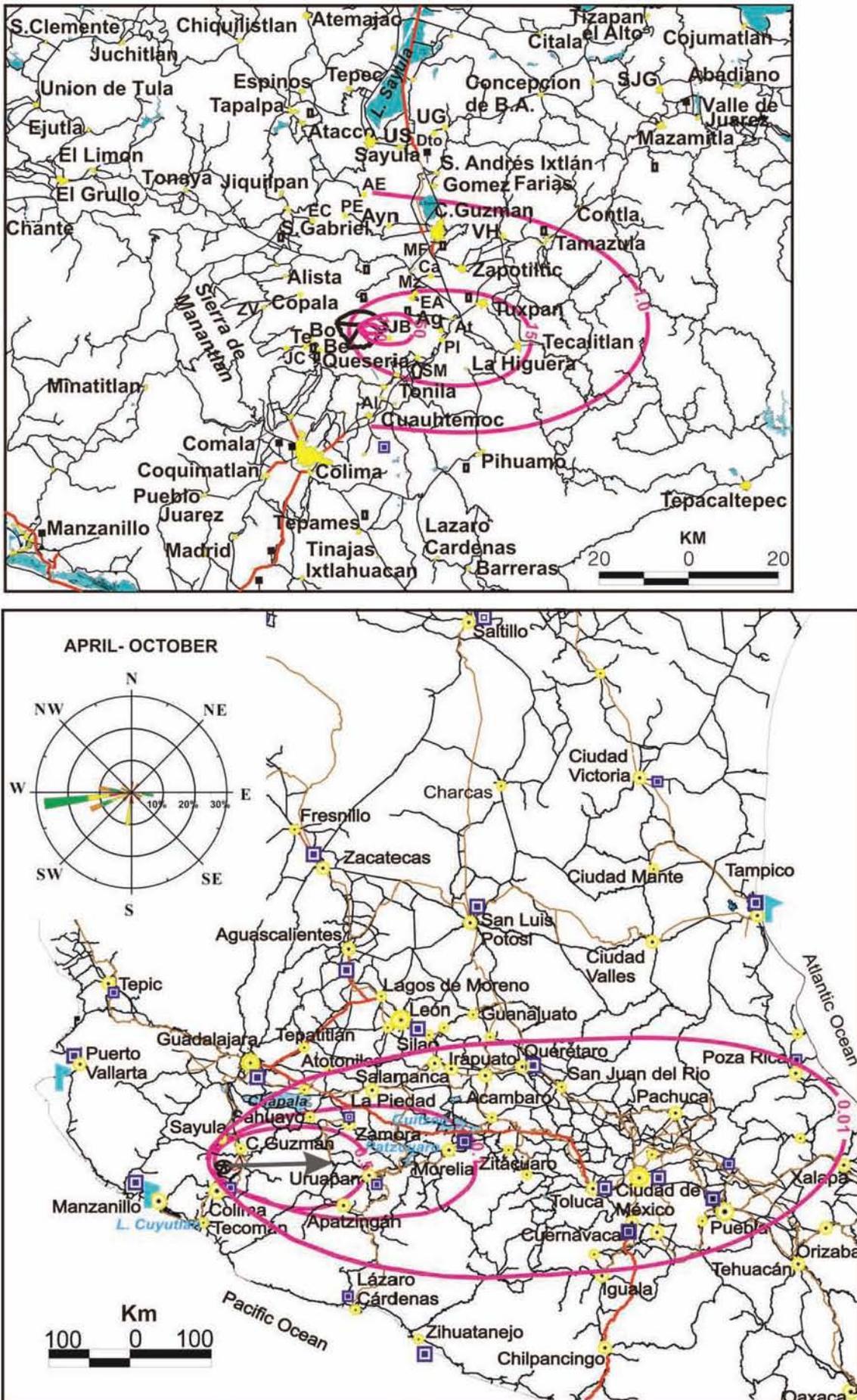


Figure 5. Scenario 2. For an eruption in April or October, showing the eastern area that would be affected by a future Plinian eruption. For details, see legend to Figure 4.

PLINAN ERUPTION SCENARIOS: COLIMA VOLCANO

Ash thickness (cm)	Localities	Population (2005)	Main economic activities	Main Roads
15	Las Canoas	140	Farming: sugar cane, agave,	Guadalajara-Colima-Manzanillo
	Ejido Atenquique	100	vegetables, corn, pigs and poultry	
	Los Mazos	90	Ranching: cattle and sheep	
	Juan Barragan	60	Trade	
	El Agosto	301	Industry: lumber, paper and	
	El Platanar	452	cement	
	Zapotiltic	21,440		
	Atenquique	849		
Tuxpan	26,134			
> 1.0	Gomez Farias	6,535	Farming: sugar cane, corn	Colima-Ciudad Guzman
	Vista Hermosa	413	orchards, forage grass, pigs and	
	Tamazula	17,441	poultry	
	Ciudad Guzman	93,609	Ranching: cattle and goat	
	La Mesa y El Fresnito	900	Trade	
	Tecalitlan	12,053	Tourism	
	La Higera	1,319		
	San Marcos	3,179		
	Tonila	3,099		
	Queseria	8,079		
	Alcaraces	1,775		
Cuauhtemoc	8,165			
0.5	Colima	294,828	Farming: corn, oats, beans,	Guadalajara-Colima Morelia-Lazaro Cardenas
	Concepción BA	4,179	sugar cane, tomatoes, pigs and	
	El Destacamento	163	poultry	
	Jiquilpan	23,132	Ranching: cattle, sheep and goat	
	Mazamitla	7,096	Trade	
	San Andres Ixtlan	4,665	Tourism	
	Tapalpa	16,057		
	Tizapan el Alto	13,755		
	Union de Guadalupe	873		
	Sayula	27,311		
	Sahuayo	59,316		
	Uruapan	238,975		
Zamora	230,777			
0.1	Morelia	735,624	Trade, Tourism	Morelia-México
	La Piedad	229,289	Tourism	
	Apatzingan	93,180	Industry: construction and	
			manufacturing Farming: corn, sorghum, poultry pigs and rabbits Ranching: cattle and sheep	
0.01	Ocotlán	81,165	Industry: shoe, leather	Salamanca-Morelia-Mexico
	Silao	66,483	and petrochemical	
	Irapuato	342,561	Trade	
	Salamanca	143,838	Tourism	
	Celaya	310,413	Farming: corn, vegetables, pigs	
	Zitácuaro	78,821	and poultry	
	Querétaro	596,450	Ranching: cattle, horse and sheep	
	San Juan del Rio	120,984		
	Mexico City	19,239,910		
	Toluca	1,633,052		
	Puebla	2,470,206		
	Cuernavaca	802,371		
	Pachuca	438,692		
	Tula	28,432		
Poza Rica	481,389			

Table 6. Scenario 2. Localities, populations, main economic activities and roads which would be affected by different ash-fall levels during an eruption occurring from April and October.

Furthermore, silting of the river would be a threat in the rainy season, with the possible formation of lahars, and the alarm system for lahars in Juan Barragan, Atenquique and San Marcos would be damaged.

The main Guadalajara-Manzanillo highway connects western Mexico with the Pacific coast. The railroad line links the center of Mexico with the port of Manzanillo, and transports import and export goods. The roads and

railroads would be blocked by ash.

The radio and television microwave stations on the northeast part of CV and in Tuxpan would have transmission problems due to interference and plate abrasion. Sayula, Tuxpan and Zapotiltic each have a power station, and power lines from Manzanillo supply power to Guadalajara; the ash would cause failures in electrical supplies and disruption of services.

>1.0 cm

From 1 cm to 15 cm of ash would be expected between 38 km and 64 km from the CV crater. More than 130,000 people live in this area. The effects on the people and economic activities would be similar to scenario 1 with more than 1 cm of ash. The forage grass would be buried, and the cattle would get sick or die by eating contaminated pasture. Ash-fall would also damage chimneys and roofs of the sugar mill in Queseria.

The national airport in the city of Colima (5,207 flights/year) would cancel services due to the ash in the air routes and airways. The Federal highway and roads that link Colima, Ciudad Guzman, Tamazula and the surrounding towns would be blocked for hours or days. The ash on the power stations in Ciudad Guzman and in Tamazula would cause short circuiting and blackouts.

0.5cm

From 0.5 cm to 1 cm of ash fall would affect areas east of CV, between 64 km and 160 km from the crater. There are more than 700,000 people living in this area, who would be subject to similar effects as in scenario 1 with a 0.5 cm of ash. The tomato, bean and oat crops would be damaged, and the livestock would get sick because of the ash.

The area has national airports in Zamora (1,061 flights/year) and Uruapan (6,010 flights/year), so the ash would force these airports to close and the airways would need to be cleaned. The two main highways between Guadalajara and Colima and Morelia and Lazaro Cardenas link the Pacific with central Mexico. These roads would be closed because of low visibility and ash accumulation. The power stations in Colima, Sahuayo, Sayula, Uruapan and Zamora supply electricity to the region, and the ash would damage the transformers and cause blackouts.

0.1 cm

From 0.1 cm to 0.5 cm of ash would be expected between 160 km and 390 km from CV, where more than 900,000 people are living in the city of Morelia and in small towns. The impact on the people and the economic activities would be similar to scenario 1 with 0.1 cm of ash. The ash would have positive effects on some agricultural areas, but the cattle would get sick, with reductions in meat and milk production.

Fine ash in the atmosphere would force the international airport in Morelia (18,144 flights/year) to shut down for days. The Lázaro Cárdenas-Morelia-México highways connect western Mexico and central Mexico, and the lack of visibility caused by the ash would create traffic problems.

The Cuitzeo and Patzcuaro lakes are habitats with endangered species, such as the white fish and Canadian duck. The ash would have adverse effects on the lake-water

quality and ecology. During the 1980 Saint Helens eruption, the volcanic ash-leachates that fell in Richland Lake were toxic for the algal populations [McKnight et al. 1982].

0.01 cm

From 0.01 cm to 0.1 cm of ash-fall would be expected up to 725 km from CV. In this area, more the 25,000,000 people live in Querétaro, Mexico City, Toluca, Puebla, Cuernavaca, Pachuca, Tula, Poza Rica and many small towns. The small amounts of ash would have minimal effects on crops, because it would be incorporated into the soil in days or weeks, and even be carried away by the wind.

In Salamanca, the petrochemical industry and refinery are important sources of income, as well as the thermoelectric power stations (including the one north of Mexico City). The ash in the atmosphere would increase the pollution in the environment and would cause respiratory problems for the people.

Fine ash would affect the international airports of Mexico City (355,593 flights/year) and Puebla (17,277 flights/year), Querétaro (12,733 flights/year), Toluca (unspecified flights) and Cuernavaca (unspecified flights), as well as the national airports in Celaya (2,400 flights/year) and Pachuca (3,707 flights/year), and cause deviation of air routes and interrupt operations for hours. The effects on the main highways and secondary roads would be small.

Scenario 3

In May the dominant wind blows to the north-northeast and north-northwest, which results in two possible scenarios.

Scenario 3 towards the north-northeast (Figure 6) would be similar to the 1913 eruption, when tephra fell on San Marcos, Tonila, Queseria, Ciudad Guzman, Zapotiltic, Tuxpan, Sayula, Guadalajara, Aguascalientes, Fresnillo, Zacatecas and Saltillo, and on small towns and farms [Waitz 1932].

100 cm

More than 100 cm of ash would be expected in the first 3 km on the north-north-eastern flank of CV. This area is covered by coniferous forest and alpine vegetation that would be buried, and the fauna would die. Ballistics would cause fires and burn the vegetation. The effects would be the same as in scenario 1 with 100 cm of ash.

50 cm

From 50 cm to 100 cm of ash would affect the south-south-eastern portion of Nevado de Colima, between 3 km and 11 km from the CV crater. The coniferous forests and grasslands would be buried in ash. Small mammals, birds, insects and reptiles would die. The seismic and visual monitoring equipment and the radio and television microwave station on the northern flank of Nevado de Colima would be destroyed.

PLINAN ERUPTION SCENARIOS: COLIMA VOLCANO

Localities	Population (2005)	Main Economic Activities	Main Roads
Las Canoas	140	Farming: sugar cane, corn	Ciudad Guzmán-Guadalajara
Ciudad Guzman	93,609	agave, sorghum, vegetables	Ciudad Guzmán-Colima
Ejido Atenquique	100	pasture, pigs and poultry	
Gomez Farias	6,535	Ranching: cattle and goat	
Juan Barragan	60	Industry: lumber and cement	
La Mesa y El Fresno	900	Trade	
Los Mazos	90	Tourism	
Zapotiltic	21,440		
Alcaraces	1,775	Farming: corn, sorghum	Guadalajara-Tuxpan
Sayula	27,311	vegetables, legumes, lemon	
Atenquique	849	sugar cane, coffee, grass	
El Agosto	301	poultry and pigs,	
El Destacamento	163	Ranching: cattle	
El Platanar	452		
Queseria	8,079		
San Andres Ixtlan	4,665		
San Gabriel	4,190		
San Marcos	3,179		
Tamazula	17,441		
Tonila	3,099		
Tuxpan	26,134		
Unión de Guadalupe	873		
Vista Hermosa	413		
Guadalajara	4,295,853	Industry: food, shoe,	
Atotonilco el Alto	26,044	pharmaceutical, textile	
Poncitlan	13,105	electronics and lumber	
Tepatitlán	126,625	Tourism	
Ocotlán	81,165	Trade	
Concepcion BA	4,179	Farming: corn, vegetable	
Tamazula	17,441	sugar cane, pigs and poultry	
Sahuayo	59,316	Ranching: cattle, horse and sheep	
Lagos de Moreno	92,712	Farming: corn, alfalfa, onion	Panamerican highway
Aguascalientes	663,671	sorghum, beans, broccoli, green beans, guava, grapes pigs and poultry	Barra de Navidad-Tampico
		Ranching: cattle and goat	
		Tourism	
		Trade	
		Industry: Chemical, textile, automobile and construction	
Charcas	20,173	Industry: shoe, leather,	Panamerican highway
Fresnillo	110,892	textile and petrochemical	
Guanajuato	70,798	Trade	
La Piedad	229,289	Tourism	
Leon and Silao	1,278,087	Farming: corn, alfalfa, garlic	
Saltillo	725,259	vegetables, grapes, grass,	
San Luis Potosí	685,934	poultry and pigs	
Zacatecas	261,422	Ranching: cattle, sheep and goat	
Zamora	127,606		

Table 7. Scenario 3. Localities, populations, main economic activities and roads which would be affected by different ash-fall levels during an eruption occurring in May (north-northeast level IV winds).

15 cm

From 15 cm to 50 cm of ash-fall would affect areas between 11 km and 38 km from CV, where more than 120,000 people live (Table 7). These people would suffer from stress, skin and eye irritation, and respiratory problems. The effects on crops and livestock would be similar to scenario 1 with 15 cm of ash.

The Tolteca cement plant is a producer of lime, cement and marble, and it is located in Zapotiltic. The economic impact on this area would be significant, because of chimney obstruction and machinery damage in factories, which could

paralyze production. Ash-fall and lightning would damage the alarm systems for lahars in Juan Barragan and Atenquique.

The main roads in this area are the Guadalajara-Ciudad Guzmán and Guadalajara-Colima highways, as well as the secondary roads that connect the towns near CV. The accumulation of ash would immediately paralyze transportation in the area.

>1.0 cm

From 1 cm to 15 cm of ash would be expected between 38 km and 64 km from CV. More than 70,000 people live in

this area. The impact expected on people would be similar to previous scenarios with >1.0 cm of ash. Orchards, sugar cane and corn, as well as forage grass in the early stages of growth, would be buried, and more mature plants would even suffer severely from the ash; the cattle would get sick. The sugar mill in Queseria, the cement factories in Zapotiltic, and the paper mill in Atenquique would be affected. Raw materials stored out in the open and the chimneys and roofs would be damaged.

The Colima-Guadalajara-Tuxpan highways have constant traffic and would be closed due to the lack of visibility and accumulation of ash. The power stations in Tuxpan and Sayula supply electricity to 43,936 users, and here the ash-fall would cause short circuits in transmission lines. Lightning would interrupt radio and television transmission at the microwave station in Tuxpan, and damage the alarms for lahars in San Marcos.

0.5 cm

From 0.5 cm to 1 cm of ash-fall would be expected between 64 km and 160 km from the CV crater, where there are more than 4,580,000 people. The ash would cause similar effects as in previous scenarios with 0.5 cm of ash. The economic activities would be affected temporarily by the lack of services and road access.

The highways that connect important cities, such as Colima, Guadalajara, Manzanillo, Ciudad Guzman, León, Morelia and Mexico City, would be affected by a lack of visibility, and ash accumulation would cause traffic problems. With the power stations in Guadalajara, Sahuayo, Ocotlan, Tamazula and Poncitlan, which supply electricity to more 600,000 users, the ash would cause power shortages and blackouts. The international airport in Guadalajara would be forced to close operations for hours or days.

Lake Chapala would also be affected by ash deposition, and the effects would be similar to scenario 1 with 0.5 cm of ash.

0.1 cm

From 0.1 cm to 0.5 cm of ash would be expected between 160 km and 390 km north-northeast from the CV crater. There are more than 900,000 inhabitants in this area, and the ash would cause skin, eye and respiratory problems. This is one of the main milk-producing areas in the country, which supplies the markets of Guadalajara, Aguascalientes and Mexico City. The impact on economic activities would be similar to those in scenario 1 with 0.1 cm of ash.

The Panamerican, Barra de Navidad-Tampico and Guadalajara highways connect with Morelia, Querétaro, México City and Aguascalientes. The lack of visibility due to the ash would cause traffic jams. The power stations in Aguascalientes and Lagos de Moreno supply electricity to more than 300,000 users, and there would be blackouts.

Furthermore, the international airport in Aguascalientes would interrupt operations for hours due to the ash in the atmosphere.

0.01 cm

From 0.01 cm to 0.1 cm of ash would be expected up to 725 km from CV. There are more than 3 million inhabitants in this area, in Leon, San Luis Potosí, Zacatecas, Guanajuato and Saltillo, and in small towns. The effects would be similar to scenario 1 with 0.01 cm of ash.

The power stations in San Luis Potosi and Saltillo, and the main roads like the Panamerican highway, would suffer minimal effects. This scenario includes the international airports of Leon (27,206 flights/year), San Luis Potosi (24,430 flights/year), Zacatecas (8,257 flights/year) and Saltillo (13,165 flights/year), and the national airport in Zamora (1,061 flights/year). Fine ash would lead to flight cancellations, due to the fine ash in the air.

Scenario 4

In May, the winds also blow north-north-westerly, resulting in this second May scenario (Figure 7).

100 cm

More than 100 cm of tephra would be expected 3 km from the CV crater, on the north-north-western flank of CV. The coniferous forest would be covered by ash and pumice, and wild animals would be buried, as in previous scenarios with 100 cm of ash.

50 cm

From 50 cm to 100 cm of ash would be expected between 3 km and 11 km from the CV crater on the south-south-western sector of the Nevado de Colima (Table 8). This zone is covered by coniferous forests and grasslands, where wild animals live, such as small mammals, and many types of birds, insects and reptiles. The impact expected on the vegetation and fauna would be similar to that in previous scenarios with 50 cm of ash. The ash, pumice and lapilli would also damage the microwave station on the northern flank of Nevado Volcano and the seismic and visual monitoring equipment at Nevado, 5.3 km from the CV crater.

15 cm

From 15 cm to 50 cm of ash would fall between 11 km and 38 km to the north-northwest of CV. More than 4,210 people live in this area, who would be subject to stress, and eye, skin and respiratory problems. Ash-fall would bury crops (tomatoes and potatoes) and cause roofs of greenhouses to collapse. Livestock would get sick or die after consuming contaminated pasture and water. San Gabriel has a power station and a radio and television microwave station,

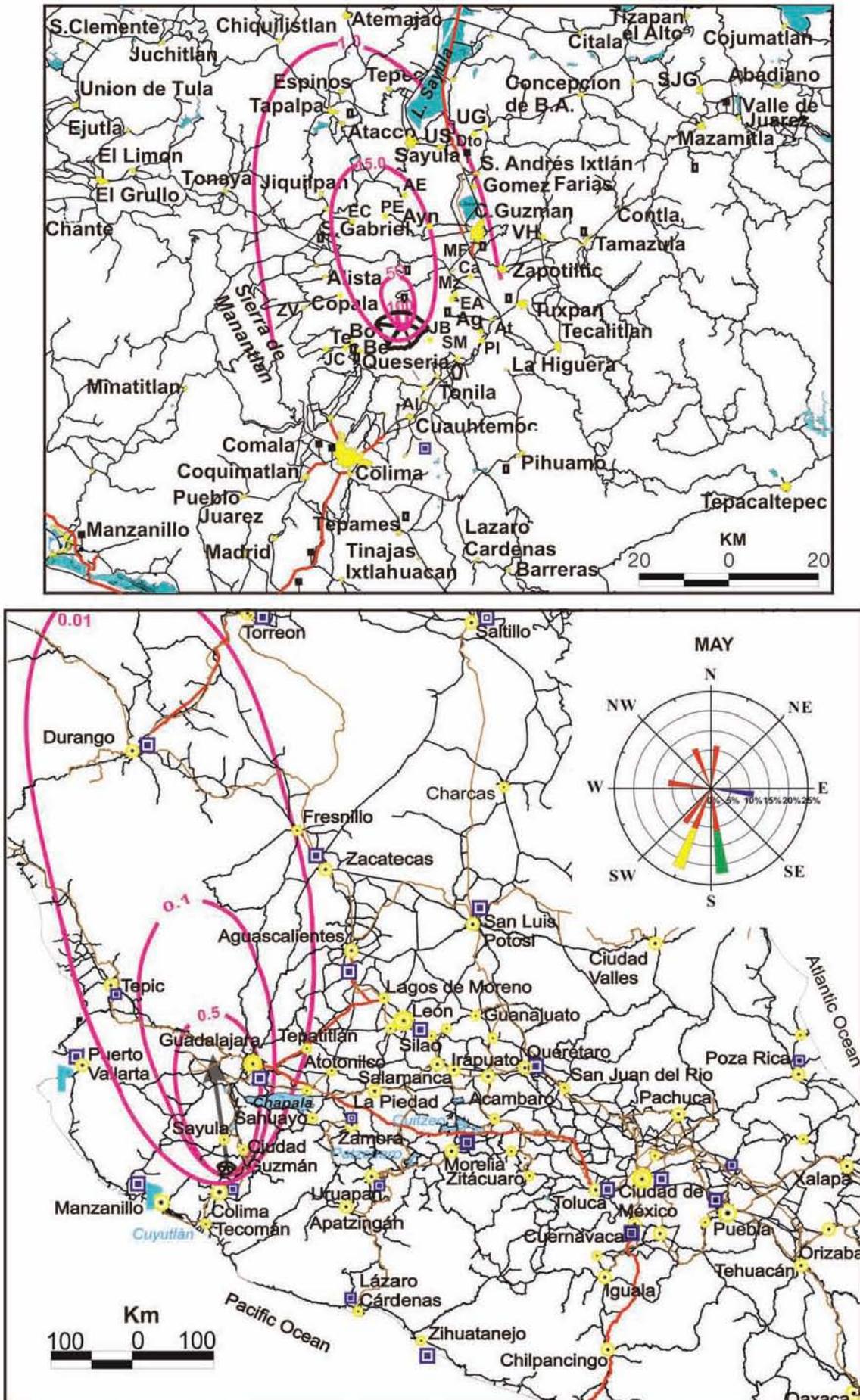


Figure 7. Scenario 4. For an eruption in May, showing the second potential, north-northwest, area that would be affected by a future Plinian eruption. For details, see legend to Figure 4.

PLINAN ERUPTION SCENARIOS: COLIMA VOLCANO

Localities	Population (2005)	Economic Activities	Main Roads
San Gabriel	4,190	Trade	Guadalajara-San Gabriel
Agua Escondida	16	Farming: corn, potatoes, tomatoes	
Los Pozos y El Ocote	4	pigs and poultry	
El Carpintero	15	Ranching: cattle and sheep	
Alista	971	Farming: sugar cane, agave, peach,	Guadalajara-Colima-Manzanillo
Atacco	1,021	vegetables, pomegranate, guava,	Ciudad Guzman-Colima
Atenquique	849	corn, sorghum, poultry and pigs	Guadalajara-Sayula-San Gabriel
Ciudad Guzman	93,609	Ranching: cattle and sheep	El Grullo-Tonaya-San Gabriel
Copala	455	Industry: cement and paper	Guadalajara-Jiquilpan-Mexico
Ejido Atenquique	110		
El Agosto	301		
El Platanar	452		
Gomez Farias	6,535		
Jiquilpan	1,656		
Juan Barragan	60		
La Mesa y el Fresnito	800		
Las Canoas	131		
Los Espinos	625		
Los Mazos	190		
Queseria	8,079		
San Andres Ixtlán	4,665		
San Marcos	3,179		
Sayula	27,311		
Tapalpa	5,301		
Tepec	1,743		
Tonila	3,099		
Tuxpan	26,134		
Usmajac	6,811		
Zapotiltic	21,440		
Atemajac	28	Industry: auto, food, pharmaceutical,	Guadalajara-Manzanillo
Chiquilistlan	3,416	electronics, textile and lumber	Guadalajara-Morelia
Concepción de Buenos Aires	4,179	Tourism	Guadalajara-Salttillo
Contla	34	Trade	Guadalajara-Barra de Navidad
Ejutla	1,229	Farming: corn, sugar cane,	El Grullo-Ciudad Guzmán
El Destacamento	163	Ranching: cattle, sheep and goat	Guadalajara-Tuxcueca-Mazamitla
El Grullo	19,364		Ixtlahuacán Del Río-Cuquío
Guadalajara	4,295,853		
Juchitlán	3,403		
Lázaro Cárdenas	1,014		
El Limón	2,965		
Mazamitla	7,096		
Quitupan	152		
San Clemente	1,078		
San Juan de Amula	488		
Tecaltitlán	3,066		
Tizapan el Alto	13,755		
Tonaya	3,238		
Union de Guadalupe	873		
Unión de tula	8,589		
Valle de Juárez	3,575		
Vista Hermosa	8		
Sierra Huichol			
Tepic	379,296	Trade	Panamerican highway
Fresnillo	110,892	Tourism	Matamoros-Mazatlán
Durango	526,659	Farming: corn, avocado, sugar cane,	
Zacatecas	122,889	coffee, chile, mango, banana,	
Tepatitlán	82,975	tobacco, pigs and poultry	
Ocotlán	81,165	Ranching: cattle, horse, sheep and goat	

Table 8. Scenario 4. Localities, populations, main economic activities and roads which would be affected by different ash-fall levels during an eruption occurring in May (north-northwest level IV winds).

where the transformers and towers would be damaged by lightning during the eruption, which would cause shortages and lack of electricity. The Guadalajara-San Gabriel highway would be closed.

>1 cm

From 1 cm to 15 cm would be expected between 38 km and 64 km north-northwest of the CV crater, where 150,000 people live in many towns. The effects on the people and

economic activities would be similar to scenario 1 with more than 1 cm of ash. The cement factories in Zapotiltic would be affected.

Power stations in San Gabriel, Sayula, Ciudad Guzman, Gomez Farias, Tuxpan and Zapotiltic supply electricity to more 70,000 users. The ash and lightning would cause short circuits in transmission lines. The radio and television microwave stations in Sayula, Tuxpan and Ciudad Guzman would suffer transmission problems due to ash interference.

Main highways, such as the Guadalajara-Manzanillo and Guadalajara-Sayula highways (and the Guadalajara-Nogales railroad) that link the Pacific Coast to north-central Mexico would have traffic jams towards Guadalajara or the Pacific due to ash on the roads.

The pH and nutrient conditions in the Zapotlan and Sayula Lagoons would be modified by ash silting, and the native plants and animals would die.

0.5 cm

From 0.5 cm to 1 cm could be expected between 64 km and 160 km from CV, where around 4,332,049 people live; the impact of the ash would be the same as scenario 1 with a 0.5 cm thickness. The economy would be affected temporarily by the lack of services and road access.

The Guadalajara international airport would have to close operations for hours or days due to ash clouds and ash over the airstrips. The power stations in Guadalajara, Cuquio, El Grullo, Mazamitla, Unión de Tula and Valle de Juarez supply electricity to over one million users, and the ash would cause power shortages and blackouts. The microwave stations in Guadalajara, El Grullo and Mazamitla would have interference problems. Main roads, such as the Guadalajara-Manzanillo and Guadalajara-Salttillo ones, would have traffic problems due to lack of visibility.

Lake Chapala would also have serious pollution due to the ash, as in scenario 1 with 0.5 thickness.

0.1 cm

From 0.1 cm to 0.5 cm of ash would be expected between 160 km and 390 km north-northwest from CV. The socioeconomic effects over the Sierra Huicholes area would be minimal due to the lower population density.

0.01 cm

From 0.01 cm to 0.1 cm of ash would be expected up to 725 km to the north-northwest of CV. More than 1,303,876 people live in this area, in Tepic, Fresnillo, Durango and Zacatecas. The fine ash would cause effects similar to those in scenario 1 with 0.01 cm of ash.

Tepic has two refineries that represent major sources of employment for local households throughout the state. The hydroelectric plants in Tepic and Durango, with capacity from 320 megawatts to 960 megawatts, are the most important power production facilities in the area. The ash in the atmosphere would increase the pollution in this area.

The Mazatlán highway that connects México City with north-western Mexico would see small effects. The power and microwave stations in Tepic, Fresnillo, Durango and Zacatecas would have interference due to the ash. There are international airports in Zacatecas (8,257 flights/year) and Durango (15,676 flights/year), as well as a national airport in Tepic (10,837 flights/year), which would be

forced to interrupt operations for hours or cause deviations to their air routes.

Scenario 5

From June to August, there is a high probability that the winds would blow towards the northwest (Figure 8).

100 cm

More than 100 cm of tephra would be expected 3 km from the CV crater on the north-western flank of CV. This area is also covered by coniferous forests and grassland that would be buried by ash, pumice and lapilli. Birds, insects and reptiles would die, as in previous scenarios with 100 cm of ash.

50 cm

From 50 cm to 100 cm of ash would be expected between 3 km and 11 km from CV, on the north-western side of CV. The coniferous forest and grass would be buried by ash, pumice and lapilli, and fires would burn the vegetation. The local fauna of this zone would die.

15 cm

From 15 cm to 50 cm of ash could affect areas between 11 km and 38 km from the CV crater, where more than 9,150 inhabitants live (Table 9). The immediate effects on the population would be stress, and skin, eye and respiratory problems, with an impact on trade, farming, ranching and industry, similar to scenario 4 with 15 cm of ash.

The Guadalajara-Ciudad Guzmán and Guadalajara-San Gabriel roads would be forced to close temporarily to remove the ash. Furthermore, the microwave stations in San Gabriel and on the northern flank of CV would have interference problems during ash-fall. San Gabriel has a power station and the transformers would be damaged by lightning, which would cause a lack of electric power for several days. Zapotitlan de Vadillo has a runway for aeroplanes, which would be obstructed by ash accumulation.

>1 cm

From 1 cm to 15 cm of ash would be expected between 38 km and 64 km northwest of CV. Around 30,123 people live in this area, who would have problems as in previous scenarios with >1 cm of ash. The Borbollon, Schulte and El Jabali ranches are private environmental protection areas that have sustainable management of natural resources. Likewise, the Hacienda San Antonio, a luxury hotel, and the La Maria Lake cabins employ local people. Furthermore, mountain biking and picnicking are important week-end activities around the CV and the Nevado de Colima, which would be closed for several months.

Zapotitlan and Atenquique would experience increased aerosol contents in the atmosphere, and the machinery and

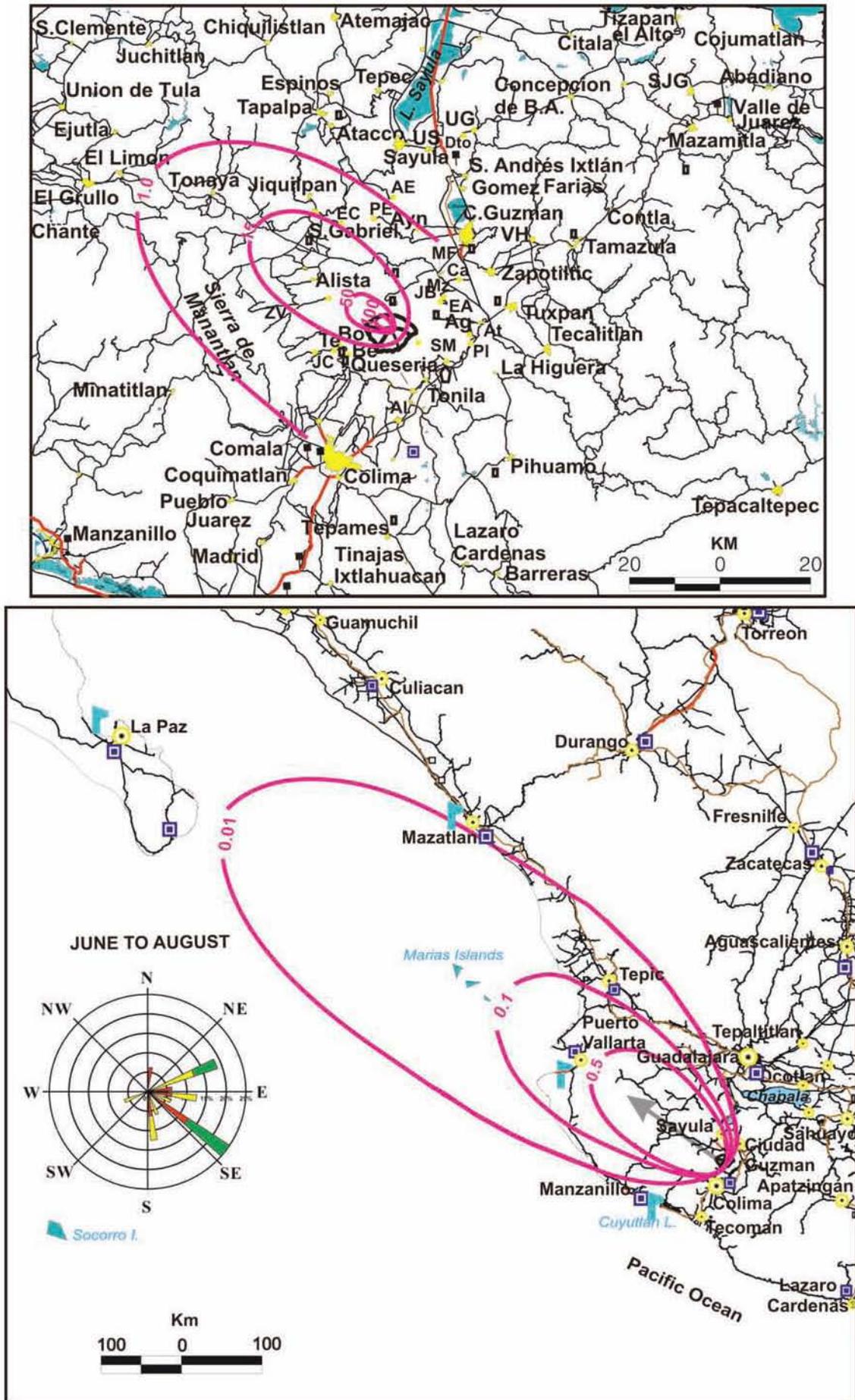


Figure 8. Scenario 5. For an eruption from June to August, showing the northwest area that would be affected by a future Plinian eruption. For details, see legend to Figure 4.

PLINAN ERUPTION SCENARIOS: COLIMA VOLCANO

Ash Thickness (cm)	Localities	Population (2005)	Economic Activities	Main Roads
15	San Gabriel	4,190	Trade	Guadalajara-Ciudad Guzmán
	Zapotitlán de Vadillo	3,115	Farming: corn, tomatoes, sugar cane,	Guadalajara-Sayula-San Gabriel
	Copala	455	agave, vegetables, potatoes, lemon,	Zapotitlán de Vadillo-San J. Del Carmen
	Alista	971	guava, mango and red plum orchards, pigs and poultry	San Gabriel-Zapotitlán de Vadillo
			Ranching: cattle and sheep	
> 1.0	El Tecuan	101	Trade	Comala-Zapotitlán de Vadillo
	Cofradía de Suchitlán	1,601	Tourism	Carrizalillos-Quesería
	Comala	8,927	Industry: cement	Manzanillo-Colima
	Ejido Atenquique	110	Farming: legumes, cereals, agave	
	El Borbollón	12	sugar cane, coffee, vegetables,	
	El Jabali	4	lemon, cucumber, rice, sorghum,	
	Hacienda San Antonio		corn and nuts, papaya, tamarind,	
	Jiquilpan	1,656	oranges, watermelon, cantaloupe	
	Juan Barragan	60	tamarind, poultry and goat	
	Juan Barragan	60	Ranching: cattle	
	La Becerrera	274		
	La Mesa y el Fresnito	800		
	La Yerbabuena	31		
	Las Canoas	131		
Los Mazos	190			
San José del Carmen	775			
Suchitlán	4,083			
Tonaya	3,228			
Zapotitlic	21,44			
0.5	Atemajac	28	Trade	Guadalajara-Manzanillo
	Chiquilistlán	3,416	Farming: corn, sugar cane,	Guadalajara-Barra de Navidad
	Concepción BA	4,179	vegetables, grassland, pigs	El Grullo-Ciudad Guzmán
	Cuquio	4,122	Ranching: cattle, sheep and goat	Ixtlahuacán-Cuquio
	Ejutla	1,229		
	El Destacamento	163		
	El Grullo	19,364		
	Juchitlán	3,403		
	Chiquilistlán	3,416		
	El Limón	2,965		
	Mazamitla	7,096		
	Minatitlán	3,961		
	San Clemente	1,078		
Sayula	27,311			
Unión de Guadalupe	873			
Unión de tula	8,589			
0.1	Tepic	379,296	Tourism	Pacific highway
	Puerto Vallarta	304,107	Industry: manufacturing, refineries	Guadalajara-Puerto Vallarta
	Ahuacatlán	6,430	Trade	Guadalajara-Tepic-Mazatlán
		Farming: sugar cane, coffee, chile,	Tepic-Puerto Vallarta	
		sweet corn, watermelon, mango,		
		banana, avocado, peas, pigs, poultry		
		Ranching: cattle and goat		
0.01	Colima	294,828	Tourism	Colima-Manzanillo
	Mazatlán	352,471	Fishing: shrimp, tuna and mullet	Manzanillo-Puerto Vallarta
	Islas Marias	1,116	Trade	Manzanillo-Tepic-Guadalajara
	Santa Maria del Oro	4,208	Industry: food, coffee and beer	México-Nogales
	Escuinapa	28,789	Farming: corn, tobacco, sugar cane,	
	Acaponeta	18,066	mango, lemon, plum, avocado, dates,	
Puerto Balleto	602	and coconut, pigs and poultry		
		Ranching: cattle, goats, ducks and geese		

Table 9. Scenario 5. Localities, populations, main economic activities and roads which would be affected by different ash-fall levels during an eruption occurring from June to August.

chimneys of the paper and cement industries would be damaged by ash abrasion. Silting of the Zarco and La Lumbre rivers due to accumulation of pyroclastic material would trigger the formation of lahars during the summer. The Lumbre and Zarco bridges would be damaged, thus blocking the San José del Carmen-Suchitlán road.

The sector to the west of CV has a network of roads, such as the Manzanillo-Colima, the Comala-San José del Carmen-Zapotitlán de Vadillo, and the Carrizalillos-Quesería highways, which would be blocked by ash accumulation. Power stations in Zapotitlic supply electricity to more 10,247 users. The ash and lightning would cause short circuits in distribution lines. The microwave station in la Becerrera would also have transmission problems due to interference or ash abrasion.

0.5 cm

From 0.5 cm to 1 cm of ash would be expected between 64 km and 160 km to the northwest of the volcano, where there are more than 87,777 people. The expected impact on people, trade, farming and cattle ranching would be similar to scenario 1 with 0.5 cm of ash.

The Guadalajara-Manzanillo, Guadalajara-Barra de Navidad and El Grullo-Ciudad Guzmán highways would have poor visibility and would experience traffic problems. The radio and television stations in El Grullo and Mazamitla would have interference problems. In this area, the power stations in Cuquio, El Grullo, Unión de Tula and Valle de Juarez supply electricity to countless users. The ash would cause power shortages and blackouts.

In the Zapotlán and Sayula Lagoons, the ash-fall would produce contamination by silting and modification of the conditions of pH and nutrients.

0.1 cm

From 0.1 cm to 0.5 cm of ash would be expected between 160 km and 390 km on the north-western side of CV. This area has 689,833 inhabitants, in Tepic, the Puerto Vallarta metropolitan area, and many towns. Puerto Vallarta the third largest port in Mexico, and it receives more than 5 million tourists each year. The economy of the area depends on tourism, which accounts for roughly 50% of all of the economic activity in the Puerto Vallarta metropolitan area. The manufacturing industry and refineries in Tepic, and the hydroelectric plants in Aguamilpa and Jumatan are the chief income sources for the local population. Other important sources are trade, farming and cattle ranching. Tourism during the summer would be paralyzed for hours or days due to ash-fall.

The Pacific highway and the Guadalajara-Vallarta, Tepic-Mazatlan freeways would have traffic problems. Puerto Vallarta also has a maritime infrastructure that provides services to cruise ships and private boats, and provides local tourist transportation. The microwave stations in Tepic and Puerto Vallarta would have interference of the radio and television signals, and the ash would paralyze these activities for hours or days. The international airports in Puerto Vallarta (38,892 flights/year) and Tepic (10,837 flights/year) would be forced to interrupt flights for hours, and would require clean-up operations on the runways and aircraft.

0.01 cm

From 0.01 cm to 0.1 cm of ash would be expected between 390 km and 725 km from CV. In this area, there are more than 699,373 inhabitants, in the Colima metropolitan area, and in Mazatlán, Islas Marias and small towns. Mazatlan is one of the most important Mexican ports because of its international trade and cruise-related tourism from the United States, and it is the main link with the La Paz port in Baja, California. Furthermore, the Islas Marias are four islands where the Marias Prison is located. Nonetheless the impact would be minimal.

The power stations in Mazatlan and Colima, as well as the Colima-Manzanillo, Guadalajara-Tepic and Mexico-Nogales roads, would expect little damage. The airports in Manzanillo (8,004 flights/year), Mazatlan (no data), Colima (5,207 flights/year), and the private airport in Escuinapa, would be affected by the ash in the atmosphere.

Scenario 6

In September, the predominant wind direction is westerly, and ash would be expected to be scattered in the same direction (Figure 9).

100 cm

More than 100 cm would fall up to 3 km from the CV crater, on the western flank of CV. This area is also covered by coniferous forests that are associated with natural grasslands. The ash would bury the vegetation and the wild animals, and especially the birds, insects and reptiles would die.

50 cm

From 50 cm to 100 cm of ash would be expected between 3 km and 11 km on the western side of CV. The ash-fall would bury the coniferous forests and natural grasslands. The wildlife would die, as in previous scenarios with 50 cm of ash. The impact would become significant for private areas, such as the El Jabali, Shulte and El Borbollon ranches in the southwest, because they would be destroyed. The coffee, corn and agave crops, and orchards and livestock would be covered by the ash.

15 cm

From 15 cm to 50 cm of ash-fall would affect areas west of CV. In this area, there are more than 5,738 inhabitants, who would suffer eye, skin and respiratory problems, as well as nervousness, as for the previously described scenarios with 15 cm thickness (Table 10). The ash would cover the crops and the cattle would die or have gastrointestinal diseases after eating contaminated grass.

The Zapotitlán de Vadillo-Guadalajara road would be closed, and it would be necessary to remove the ash. The radio and television microwave station in La Becerrera would be damaged during the ash-fall. The runways for aeroplanes in Zapotitlan Vadillo and at the Jabali ranch would be obstructed by ash accumulation.

> 1 cm

From 1 cm to 15 cm of ash would be expected between 38 km and 64 km to the west side of CV, an area that has more than 319,840 inhabitants. The population would experience the same impact as in scenario 1 with >1 cm of ash. The cereal crops would be damaged during the pollination period, thus reducing grain quality; livestock would get sick or die by eating contaminated pasture.

The state roads connecting Zapotitlán de Vadillo-Colima and Colima-Puerto Vallarta would be closed due to lack of visibility and accumulation of ash. The power stations in Colima supply electricity to 54,939 users, and it would suffer blackouts due to short circuits. The microwave station in San Gabriel would have transmission problems, and the airport in Colima would be forced to close operations, to remove the ash from the aeroplanes, runways and taxiways.

0.5 cm

From 0.5 cm to 1 cm of ash would be expected between 64 km and 160 km to the western side of CV, where there

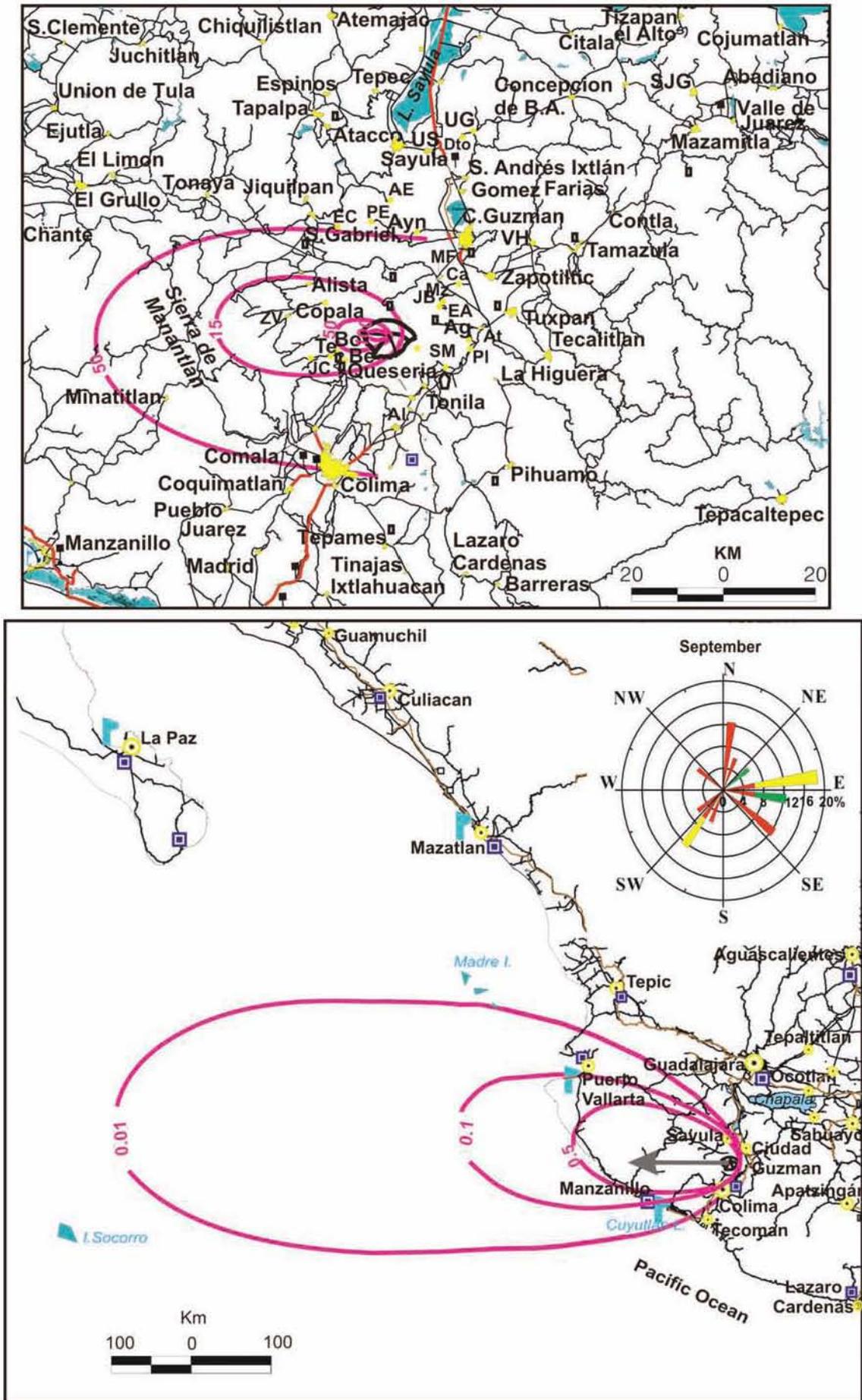


Figure 9. Scenario 6. For an eruption in September, showing the western area that would be affected by a future Plinian eruption. For details, see legend to Figure 4.

PLINAN ERUPTION SCENARIOS: COLIMA VOLCANO

Ash Thickness (cm)	Localities	Population (2005)	Economic Activities	Main Roads
50	Shulte ranch	0	Tourism	secondary roads
	Borbollón ranch	12	trade	
	El Jabalí ranch	4	Farming: agave, corn, sugar cane, agave lemon, vegetables, pigs and poultry Ranching: cattle	
15	Hacienda San Antonio	no data	Trade	Zapotitlán de Vadillo-Colima
	La Yerbabuena	31	Tourism	Zapotitlán de Vadillo-Guadalajara
	La Becerra	274	Farming: corn, agave, legume, cereals,	
	El Tecuan	101	sugar cane, coffee, vegetables, sorghum,	
	San José del Carmen	775	lemon, peach, guava, oranges, poultry	
	Zapotitlán de Vadillo	3,115	and pigs	
	Alista	971	Ranching: Cattle and goat	
> 1.0	Alcaraces	1,775	Tourism	Zapotitlán de Vadillo-Colima
	Cofradia de Suchitlan	1,601	Trade	Colima-Puerto Vallarta
	Colima	294,828	Farming: vegetables, sugar cane, corn,	
	Comala	8,921	grassland, poultry and pigs	
	Cuauhtemoc	4,665	Ranching: cattle, sheep and goat	
	Minatitlan	3,961		
	San Gabriel	4,190		
Suchitlán	4,083			
0.5	El Grullo	19,364	Tourism	Colima-Coquimatlan
	Atemajac	28	Trade	Barra de Navidad-El Grullo
	Chiquilistlan	3,416	Farming: vegetables, sugar cane, corn,	Ixtlahuacán-Cuquio
	Coquimatlan	11,374	grassland, pigs and poultry	
	Ejutla	1,229	Ranching: cattle, sheep and goat	
	El Destacamento	163		
	El Limón	2,965		
	Juchitlan	3,403		
	San Clemente	1,078		
	San Gabriel	4,190		
	San Juan de Amula	488		
	Tonaya	3,238		
	Union de Guadalupe	873		
Unión de Tula	8,589			
0.1	Armeria	14,091	Trade	Colima-Manzanillo
	Cuyutlán	926	Agro-industrial production of lemon,	Manzanillo-Puerto Vallarta
	Manzanillo	110,728	coconut and and coconut fiber processing and coconut fiber processing in Armeria salt production in Cuyutlán. Farming: Lemon, corn, rice, palm, sesame, sorghum, fruit and legumes	Minatitlán-Cuyutlán-Manzanillo
0.01	Coquimatlán	11,374	Tourism	Pacific Highway
	Puerto Vallarta	177,830	Trade	
	Sayula	27,311	Industry: cement and gypsum	
	Tecomán	76,166	Farming: sugar cane, limes, coconuts, tamarind, mango, banana, tobacco, coffee, sweet corn, dry beans, legumes, pigs, poultry Ranching cattle and horses	Guadalajara-Puerto Vallarta

Table 10. Scenarios 6 and 7. Localities, populations, main economic activities and roads which would be affected by different ash-fall levels during an eruption occurring in September or November and December.

are more than 56,208 people living, who would have eye, skin and respiratory problems. The sugar cane, vegetable and forage grass would be affected. The livestock would get sick by eating pasture contaminated with ash.

The Guadalajara-Manzanillo and El Grullo-Ciudad Guzman roads would have traffic problems due to a lack of visibility. The power stations and radio and television microwave stations in El Grullo and Mazamitla would have interference problems.

0.1 cm

From 0.1 cm to 0.5 cm of ash would be expected between 160 km and 390 km west of CV, an area with more than 125,235 people, living in Armeria, Manzanillo, Cuyutlán and small towns. The population would suffer problems similar to those in previous scenarios with 0.1 cm of ash. The ash would contaminate the salt production in Cuyutlan. The

effects on some agricultural areas would be minimal.

The Colima-Manzanillo highway would have traffic problems due to slippery roads and the low visibility caused by ash. The international airport in Manzanillo, which handles 8,004 flights/year, would suspend operations for hours or days. In this area, there are also two thermoelectric plants in Manzanillo, and the ash would increase atmospheric pollution there.

0.01 cm

From 0.01 cm to 0.1 cm of ash would be expected between 390 km and 725 km from CV. In this area, there are more than 253,996 inhabitants, in Puerto Vallarta, Tecoman and Sayula. Ash would also fall in the Pacific Ocean area, affecting ships. The tourist and maritime activities in this area would also be affected for hours or days.

The microwave stations in Puerto Vallarta and in

Tecoman would have few problems, as would the highways of the Pacific area; however, for the airport in Puerto Vallarta that handles 38,892 flights/year, the fine ash would interrupt flights and airport operations.

Scenario 7

During November and December, the dominant winds blow westward, with slight variations to the west-southwest. Therefore, similar impacts will be expected to those depicted in scenario 6, although the areas affected would be further south, perhaps producing more ash on Colima and Tecoman than in September (Figure 10). The scenarios are summarized in Table 11.

7. Arrival Time

It is possible to estimate the time of arrival of the ash in the main cities. Ciudad Guzman would expect about 15 cm of ash in about 10 minutes if the Plinian eruption occurs from January to May or in October; (Table 12). In Guadalajara, about 0.5 cm would arrive in less than 1 hour, while in León, 0.1 cm would begin falling after nearly 2 hours from January to March and in May. Cities like Mexico City and Puebla would have ash-fall 5 hours and 6 hours 16 minutes after of an eruption, if the event occurs in April or in October. Tourist cities such as Manzanillo, Puerto Vallarta and Mazatlan would expect between 0.1 cm and 0.01 cm of ash 35 minutes, and 2 hours and 4 hours,

Scenario and dominant wind direction	Ash thickness (cm)	City	P	Airport	F
1 - NNE	0.5	Guadalajara	1	Miguel Hidalgo y Costilla	1
		Leon	1	El Bajío	2
	0.01	Aguascalientes	2	Jesús Terán Pereda	2
		San Luis Potosí	3	Ponciano Arriaga	2
		Victoria Ciudad	3	Gral. Pedro José Méndez	no data
		Celaya	3	Celaya	3
2 - E	> 1.0	Colima	3	Miguel de la Madrid H	3
	0.5	Zamora	3	Zamora	3
		Morelia	2	Francisco Mujica	3
	0.01	Uruapan	3	Ignacio López Rayón	3
		Cuernavaca	2	Gral. Mariano Matamoros	no data
		Mexico City	1	Benito Juárez	1
		Pachuca	3	Juan G. Villasana	no data
		Puebla	1	Hermanos Serdán	2
		Querétaro	2	Querétaro	2
	Toluca	1	Adolfo Lopez Mateos	no data	
Celaya	3	Celaya	3		
3 - NE	0.5	Guadalajara	1	Miguel Hidalgo y Costilla	1
		Aguascalientes	2	Jesús Terán Pereda	2
	0.01	Saltillo	2	Ramos Arizpe	2
		San Luis Potosi	3	Ponciano Arriaga	2
		Zacatecas	3	Gral. Leobardo C. Ruiz	3
		Zamora	3	Zamora	3
4 - NNW	0.5	Guadalajara	1	Miguel Hidalgo y Costilla	1
		Durango	2	Gral. Guadalupe Victoria	2
	0.01	Tepic	3	Amado Nervo	2
5 - NW	0.5	Guadalajara	1	Miguel Hidalgo y Costilla	1
		Puerto Vallarta	3	Gustavo Díaz Ordaz	2
	0.01	Tepic	3	Amado Nervo	2
		Manzanillo	3	Manzanillo	3
		Mazatlán	3	Rafael Buena	no data
Colima	3	Miguel de la Madrid H	3		
6 - W	>1.0	Colima	3	Miguel de la Madrid H	3
7 - WSW	0.1	Manzanillo	3	Manzanillo	3
	0.01	Puerto Vallarta	3	Gustavo Díaz Ordaz	2

Table 11. Cities and airports which would be affected by future Plinian eruption. P population 1: >1,000,000; 2: 500,000-1,000,000; 3: 100,000-500,000. F number of flights/year (2006), 1: >50,000; 2: 10,000-50,000; 3: 1,000-10,000.

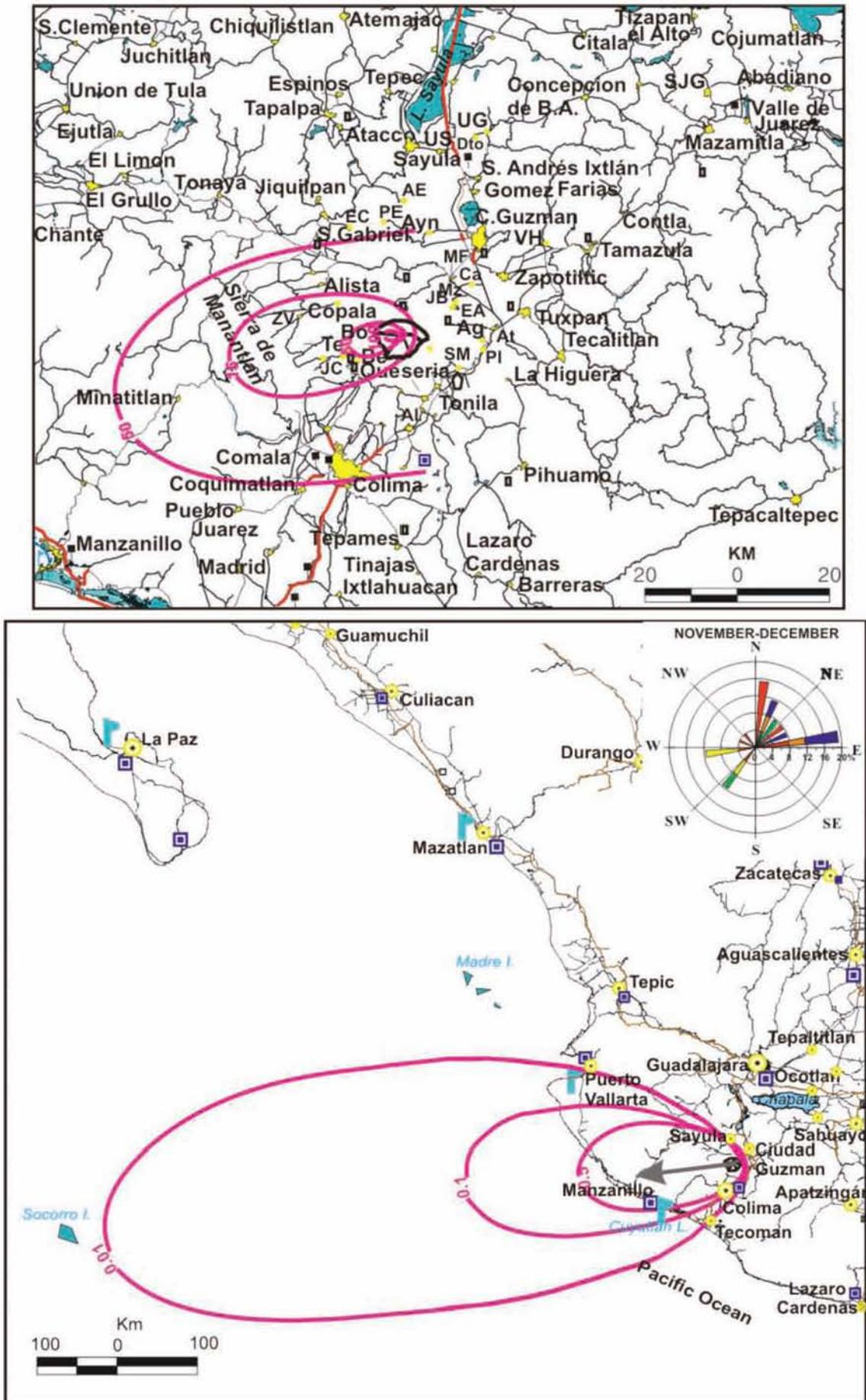


Figure 10. Scenario 7. For an eruption in November or December, showing the west-southwest area and the Pacific Coast that would be affected by a future Plinian eruption. For details, see legend to Figure 4.

Scenario/month	City	Estimated Time to Ash Fall	
		Maximum	Minimum
1-January to March		>150km/h	25km/h
	Ciudad Guzman	10'	1h 02'
	Guadalajara	56'	5h 37'
	Aguascalientes	2h 08'	12h 49'
	Leon	1h 50'	11h
	Saltillo	4h 50'	29h
	San Luis Potosi	2h 39'	15h 52'
2- April and October		100km/h	50km/h
	Ciudad Guzman	15'50"	31' 21"
	Colima	18'	36'
	Mexico City	5h 03'	10h 06'
	Morelia	6h 15'	12h 30'
	Puebla	6h 16'	12h 32'
	Querétaro	4h	8h
	Uruapan	1h 48'	3h 36'
	Zamora	1h 27'	2h 54'
3-May (NNE)		50km/h	25km/h
	Aguascalientes	6h 24'	12h 49'
	Ciudad Guzman	31'	1h 02'
	Guadalajara	2h 48'	5h 37'
	San Luis Potosi	7h 55'	15h 52'
	Zacatecas	7h48'	15h 37'
	Zamora	2h 54'	5h 49'
4-May (NNW)		100km/h	50km/h
	Colima	18'	36'
	Guadalajara	1h 24'	2h 48'
	Manzanillo	52'	1h 45'
	Mazatlan	4h 44'	9h 05'
	Puerto Vallarta	2h 06'	4h 12'
	Tepic	1h 32'	3h 06'
5-June to August		100km/h	50km/h
	Colima	18'	36'
	Manzanillo	52'	1h 45'
	Puerto Vallarta	2h 06'	4h 12'
6-September		50km/h	25km/h
	Colima	36'	1h 12'
	Manzanillo	1h 45'	3h 29'
	Puerto Vallarta	4h 12'	8h 24'
7-Nov-December		>150km/h	25km/h
	Colima	12'	1h 12'
	Manzanillo	35'	3h 29'
	Puerto Vallarta	1h 24'	8h 24'

Table 12. Estimated arrival times for ash in the main cities, according to month of eruption and maximum and minimum wind speeds.

respectively, after of the eruption onset, if it is from May to December.

8. Conclusions

Historical analysis has shown that CV has a cyclic behaviour, with a VEI 4 Plinian eruption that destroys the central dome occurring approximately every 100 years. The recurrence interval of these Plinian eruptions and similarities between the present-day activity and that which preceded the 1913 eruption indicate that there might be another eruption of this type in the near future.

Our analysis of wind data from 1990 to 2005 shows that during a Plinian eruption the ash would be dispersed in different quadrants throughout the year. The scenarios show that from January to March, ash-fall hazard zones are situated to the northeast of CV, in April and October towards the east, and in May the areas affected would be mainly to the north-northeast or north-northwest. In an eruption

occurring from June to August, the ash would travel towards the northwest, in September, towards the west, and in November and December, towards the west-southwest. The wind directions at the time could fluctuate and modify the scenarios in any secondary directions.

The scenarios with a major probability of occurrence are 1 and 2 during January to March, and April and October, as the winds show major stability. The north-eastern and eastern areas are more vulnerable because of the greater density of the populations in those area. The immediate effects on the local population would be respiratory problems and psychological stress. The agricultural and livestock sectors would suffer serious financial losses. Cattle would require supplementary feed, due to contamination of pastures because of the ash-fall. The biggest impact would be on farmer incomes due to the damage the ash would cause to pastures, vehicles and buildings. Likewise, the telecommunications stations on the northern flank of the Nevado Volcano and the seismic and visual monitoring equipment at Nevado, 5.3 km from the CV crater, would be destroyed. The industrial activities of the Queseria sugar mill, the Atenquique paper mill, and the cement plants in Zapotiltic would halt due to the obstruction of their chimneys and the abrasion of any machinery located outside. The Zapotlan Lagoon and Chapala, Cuitzeo and Patzcuaro lakes would have serious contamination by silting and modifications to the conditions of pH and nutrients.

The international airports of Guadalajara and Aguascalientes, San Luis Potosí, León, México D.F., and Zacatecas with more 10,000 flights/year, and the national airports of Celaya, Zamora and Colima Uruapan with less than 10,000 flights/year might forced to interrupt flights for hours or days, and would require clean-up operations on the runways and aircraft. The permanently busy Guadalajara-Manzanillo highway would be blocked by ash and lack of visibility.

Similar effects would be expected in scenarios 4, 5, 6 and 7, with the western areas at risk in the summer, and the tourist and commercial ports of Manzanillo, Puerto Vallarta and Mazatlán would be affected during high season. The salt industry in Cuyutlán and the thermoelectric power stations in Manzanillo and Tepic would be affected by fine ash. The airports of Puerto Vallarta, Manzanillo, Mazatlán, Durango, Colima and Tepic would be forced to close operations.

Acknowledgements. The authors would like to thank Don Melchor Urzua, Director of Civil Protection at Colima, and Gabriel Reyes, Head of the Colima Volcano Observatory, for their kind assistance and recommendations while in Colima. The people in the area were always helpful with the study, and especially Marisela Sandoval. The Universidad Nacional Autónoma de Mexico funded this study through projects from DGAPA (PAPIIT) and the Instituto de Geofísica. The authors would also like to acknowledge the field assistance of their students, Amiel Nieto, Mirna Garcia and Dorilen Camacho.

References

- Aceves, Q.J.F., A.L. Martin Del Pozzo and B.J. López (2007). Volcanic hazard zonation of the Nevado de Toluca Volcano, Central Mexico, *Nat. Hazards*, 41 (1), 159-180; doi: 10.1007/s11069-006-9029-6.
- Andronico, D., S. Branca, S. Calvari, M.R. Burton, T. Calabiano, R.A. Corsaro, P. Del Carlo, G. Garfi, L. Lodato, L. Miraglia, F. Murè, M. Neri, E. Pecora, M. Pompilio, G. Salerno and L. Spampinato (2005). A multidisciplinary study of the 2002-2003 Etna eruption: insights into a complex plumbing system, *B. Volcanol.*, 67 (4), 314-330.
- Arreola, J.M. (1915). Catálogo de las erupciones antiguas del Volcán de Colima, *Memorias de la Sociedad Antonio Alzate*, 32, 443-481.
- Bárcena, M. (1887). Informe sobre el estado actual del Volcán de Colima, *Anales del Ministerio de Fomento, México*, 328-365.
- Bretón, M., J. Ramírez and C. Navarro (2002). Summary of the historical eruptive activity of Volcán de Colima, Mexico, 1519-2000, *J. Volcanol. Geoth. Res.*, 117, 21-46.
- Carey, S. and R.S.J. Sparks (1986). Quantitative models of the fallout and dispersal of tephra from volcanic eruption columns, *B. Volcanol.*, 48, 109-125.
- Carey, S. and H. Sigurdsson (1989). The intensity of plinian eruptions, *B. Volcanol.*, 51, 28-40.
- Carey, R.J., B.F. Houghton and T. Thordarson (2010). Tephra dispersal and eruption dynamics of wet and dry phases of the 1875 eruption of Askja Volcano, Iceland, *B. Volcanol.*, 72 (3), 259-278; doi: 10.1007/s00445-009-0317-3.
- Casadevall, T.J. (1992). Volcanic hazards and aviation safety, *F.A.A. Aviation Safety Journal*, 2 (3), 1-11.
- Casadevall, T.J. (1994). The 1989-1990 eruption of Redoubt Volcano, Alaska: Impacts on Aircraft operations, *J. Volcanol. Geoth. Res.*, 62 (1-4), 301-316.
- Ciudad Real, A. de (1976). Tratado curioso y docto de las grandezas de la Nueva España, 2nd ed. (1st ed. Madrid, 1872), UNAM México, 2 voll.
- Cook, R.J., J.C. Barron, R.I. Papendick and G.J. Williams III (1981). Impact on Agriculture of the Mount St. Helens Eruptions, *Science*, 211 (4477), 16-22; doi: 10.1126/science.211.4477.16.
- Cortes, A., V.H. Garduno, C. Navarro, J.C. Komorowski, R. Saucedo, J.L. Macias and J.C. Gavilanes (2005). Carta Geológica del Complejo Volcánico de Colima, Con Geología del Complejo Volcánico de Colima, *Cartas geológicas y mineras 0185-4798*, vol.10.
- Costa, A., F. Dell'Erba, M.A. Di Vito, R. Isaia, G. Macedonio, G. Orsi and T. Pfeiffer (2009). Tephra fallout hazard assessment at the Campi Flegrei caldera (Italy), *B. Volcanol.*, 71 (3), 259-273; doi: 10.1007/s00445-008-0220-3.
- De la Cruz, S. (1993). Random patterns of activity of Colima Volcano, Mexico, *J. Volcanol. Geoth. Res.*, 55, 51-68.
- Delgado, G.H. (2001). Patrones de viento en las cercanías del Volcán Popocatepetl, los productos balísticos y sus efectos, In: *Las cenizas volcánicas del Popocatepetl y sus efectos para la aeronavegación e infraestructura aeroportuaria*, Centro Nacional de Prevención y Desastres, Instituto de Geología, UNAM México, 51-79.
- De Vita S., G. Orsi, L. Civetta, A. Carandente, M. D'Antonio, A. Deino, T. Di Cesare, R.V. Fisher, R. Isaia, E. Marotta, A. Necco, M.H. Ort, L. Pappalardo, M. Piochi, J. Southon (1999). The Agnano-Monte Spina eruption (4100 years B.P.) in the restless Campi Flegrei caldera, *J. Volcanol. Geoth. Res.*, 91, 269-301.
- Díaz, S. (1906). Efemérides del Volcán de Colima (1893-1905), *Secretaria de Fomento, México*, 168 pp.
- Dirección General de Estadística (1918). Censo General de Habitantes 1910, Jalisco, México, 179 pp.
- Flores, J.A. (1987). Las erupciones del Volcán de Colima, *Colección: Cuaderno de difusión científica*, Instituto de Geografía y Estadística, Universidad de Guadalajara, 10, 7-52.
- Folch, A. and A. Felpeto (2005). A coupled model for dispersal of tephra Turing explosive eruptions, *J. Volcanol. Geoth. Res.*, 145, 337-349.
- Fonseca, A.R. (2003). Efectos Ambientales de la erupcion de 1913 del Volcan de Colima, y sus proyecciones a futuro, *Tesis de maestria*, Universidad Nacional Autonoma de Mexico, 76 pp.
- Fonseca, R., A.L. Martin Del Pozzo, I. Perez, M. Garcia (2007). Ash fall impact from Colima Volcano during may and June 2005, In: *El Chichon volcano: twenty-five years later. A commemorative conference*, edited by J.M. Espindola, J.L. Arce and J.L. Macias, Universidad Nacional de México, IAVCEI, 31.
- García-Acosta, V. and R.G. Suárez (1996). Los sismos en la historia de México, *Fondo de Cultura Económica. Mexico*, 718 pp.
- González, P., A.L. Martin Del Pozzo, A.J. Panohaya and J.A. Gante González (1993). Estudio de la sismicidad y deformación del Volcán de Colima durante la crisis de abril de 1991, *Geofís. Int.*, 32 (4), 671-682.
- Guffanti, M., G. Mayberry, T.J. Casadevall and R. Wunderman (2009). Volcanic hazard to airports, *Nat. Hazards*, 51 (2), 287-302; doi: 10.1007/s11069-008-9254-2.
- GVN (2001). Global Volcanic Program, *Bulletin of the Global Volcanism Network*; <http://www.volcano.si.edu/reports/bulletin/>.
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (2005). II Conteo de población y vivienda Resultados Definitivos, tabulados básicos; <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/espanol/sistemas/conteo2005/>.
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (2007). Anuario estadístico por estado; <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/espanol/sistemas/Aee07/estatal/col/index.htm>.
- Houghton, B.F., C. Bonadonna, C.E. Gregg, D.M. Johnston,

- W.J. Cousinsb, J.W. Colec and P. Del Carlo (2006). Proximal tephra hazards: Recent eruption studies applied to volcanic risk in the Auckland volcanic field, New Zealand, *J. Volcanol. Geoth. Res.*, 155 (1-2), 138-149.
- Horwell, C. and P. Baxter (2006). The respiratory health hazards of volcanic ash: a review for volcanic risk mitigation, *B. Volcanol.*, 69, 1-24; doi: 10.1007/s00445-006-0052-y.
- Luhr, J.F. and I.S.E. Carmichael (1982). The Colima volcanic complex, Mexico, Part III: Ash and scoria-fall deposits from the upper slopes of Volcán Colima, *Contrib. Mineral. Petr.*, 80, 262-275.
- Luhr, J.F. and I.S.E. Carmichael (1990). Geology of Volcán the Colima, Universidad Nacional Autónoma de México, *Boletín de Instituto de Geología*, 107, 101-107.
- Lugo, J., A.L. Martin Del Pozzo and S.L. Vázquez (1993). Estudio Geomorfológico del Complejo de Colima, *Geofis. Int.*, 32 (4), 633-641.
- Macedonio, G., A. Costa and A. Folch (2008). Ash fallout scenarios at Vesuvius: Numerical simulations and implications for hazard assessment, *J. Volcanol. Geoth. Res.*, 178, 366-377.
- Macias, J.L., R. Saucedo, J.C. Gavilanes, N. Varley, S. Velasco, M. Bursik, V. Vargas and A. Cortés (2006). Flujos piroclásticos asociados a la actividad explosiva del Volcan de Colima y perspectivas futuras, *GEOS*, 25 (3), 340-351.
- McKnight, D.M., G.L. Feder and A. Stiles (1982). Effects on a blue-green alga of leachates of ash from the May 18 eruption, In: *The 1980 eruptions of Mount St. Helens*, edited by P.W. Lipman and D.R. Milleneaux, Washington, Geological Survey Professional Paper, 733-741.
- Martin Del Pozzo, A.L. and M.V.H. Romero (1988). El volcán de Colima: un estudio sobre riesgo, *Litosfera*, 2 (1), 43-55.
- Martin Del Pozzo, A.L., M. Sheridan, D. Barrera, H.J. Lugo and S.L. Vazquez (1995a). Potencial hazards from Colima Volcano, *Geofis. Int.*, 34 (4), 363-376.
- Martin Del Pozzo, A.L., M. Sheridan, D. Barrera, H.J. Lugo and S.L. Vazquez (1995b). Mapa de peligros Volcán de Colima, Universidad Nacional autónoma de México.
- Martin Del Pozzo, A.L., R. Fonseca and D. Barrera (2002). El Volcán de Colima, La erupción de 1913, In: *Desastres Naturales en América Latina*, edited by H.J. Lugo and M. Inbar, Fondo de Cultura Económica, México, 85-100.
- Martin Del Pozzo, A.L., M.T. González, P. R. Espinasa-Pereña, M.A. Butron and M. Reyes (2008). Characterization of the recent ash emissions at Popocatepetl Volcano, Mexico, *J. Volcanol. Geoth. Res.*, 170 (1-2), 61-75.
- Medina, M.F. (1983). Analysis of the eruptive history of the Volcán de Colima, México (1560-1950), *Geofis. Int.*, 22 (2), 157-178.
- Mooser, F. (1961). Los volcanes de Colima, *Boletín del Instituto de Geología México*, 61, 49-71.
- Mota Padilla, M. de la (1742). Historia de la Conquista de la Nueva Galicia, Guadalajara, II, 310.
- Navarro, O.C., J.C. Gavilanes and A. Cortés (2002). Movement and emplacement of lava flows at Volcán de Colima, México: November 1998-February 1999, *J. Volcanol. Geoth. Res.*, 117 (1-2), 155-167.
- Navarro, O., C.A. Cortes and A.J.A. Téllez (2003). Mapa de Peligros del Volcán de Colima, Universidad de Colima, México.
- Nieto, A., A.L. Martin Del Pozzo, R. Fonseca and M. Garcia (2007). Effect of the ash Fall on the Human Health at Colima Volcano During 2005-2006, American Geophysical Union, Spring Meeting 2007, V41A-05.
- Pérez de León, J.M. (1789). Descripción del Distrito de Colima y del Corregimiento de San Miguel Xilotlán en 1789, In: *Documentos para la historia de Colima: Siglos XVI-XIX*, México 1979, 252.
- Pfeiffer, T., A. Costa and G. Macedonio (2005). A model for the numerical simulation of tephra fall deposits, *J. Geophys. Res.*, 140 (4), 273-294.
- Puga, B.G. (1889). La última erupción de Colima, *Memoria Sociedad Científica Antonio Alzate*, México, 3, 97-104.
- Reyes, D.G. and R.S. De la Cruz (2002). Experience in the short-term eruption forecasting at the Volcán de Colima, México and public response to forecasts, *J. Volcanol. Geoth. Res.*, 117, 121-127.
- Robin, C., G. Camus and A. Gougaud (1991). Eruptive and magmatic cycles at Fuego de Colima Volcano (Mexico), *J. Volcanol. Geoth. Res.*, 45 (3-4), 209-225.
- Rodríguez-Elizarrarása, S., C. Siebeb, J.-C. Komorowskib, J.M. Espíndolac and R. Saucedo (1991). Field observations of pristine block and flow deposits emplaced April 16-17 1991 at Volcán de Colima, México, *J. Volcanol. Geoth. Res.*, 48 (3-4), 399-412.
- Saucedo, R. (1997). Reconstrucción de la Erupción de 1913 del Volcán de Colima, Tesis de maestría, Posgrado en Ciencias de la Tierra, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, 185 pp.
- Saucedo, R., J.L. Macías, M.I. Bursik, J.C. Mora, J.C. Gavilanes and A. Cortes (2002). Emplacement of pyroclastic flows during the 1998-1999 eruption of Volcán de Colima, México, *J. Volcanol. Geoth. Res.*, 117 (1-2), 129-153.
- Saucedo, R., J.L. Macías, J.C. Gavilanes, J.L. Arce, C. Komorowski, J.E. Gardner, G. Valdez-Moreno (2010). Eyewitness, stratigraphy, chemistry, and eruptive dynamics of the 1913 Plinian eruption of Volcán de Colima, México, *J. Volcanol. Geoth. Res.*, 191 (3-4), 149-166; doi: 10.1016/j.jvolgeores.2010.01.011.
- Schuster, R. (1982). Effects of the eruptions on civil works and operation in the pacific northwest, In: *The 1980 eruptions of Mount St. Helens*, edited by P.W. Lipman and D.R. Milleneaux, Washington, Geological Survey Professional Paper, 701-718.
- Selva, J., A. Costa, W. Marzocchi and L. Sandri. (2010). BET_VH: exploring the influence of natural uncertain-

- ties on long-term hazard from tephra fallout at Campi Flegrei (Italy), *B. Volcanol.*, 72 (6), 717-733; doi: 10.1007/s00445-010-0358-7.
- Sigurdsson, H., S. Carey, W. Cornell and T. Pescatore (1985). The Eruption of Vesuvius in A.D. 79, *Nat. Geo. Res.*, 1 (3), 332-387.
- Smithsonian Institution (1988). Colima, *Bulletin of the Global Volcanism Network*, 13; <http://www.volcano.si.edu/reports/bulletin/>.
- Smithsonian Institution (1993). Colima, *Bulletin of the Global Volcanism Network*, 18; <http://www.volcano.si.edu/reports/bulletin/>.
- Smithsonian Institution (2000). Colima, *Bulletin of the Global Volcanism Network*; <http://www.volcano.si.edu/reports/bulletin/>.
- Smithsonian Institution (2003). Colima, *Bulletin of the Global Volcanism Network*; <http://www.volcano.si.edu/reports/bulletin/>.
- Starr, F. and J.M. Arreola (1903). The Recent Eruptions of Colima, *J. Geol.*, 11 (8), 749-761.
- Tello, F.A. (1651). Libro segundo de la Crónica Miscelánea de la conquista espiritual y de la Santa Provincia de Xalisco en el Nuevo Reino de la Galicia y Nueva Vizcaya y Descubrimiento del Nuevo México, Guadalajara, 886 pp.
- Thorpe, R.A., Gibson, I.L. and J.S. Vízcaíno (1977). Andesitic pyroclastic flows from Volcán de Colima, *Nature*, 265, 724-725.
- Vízcaíno, J.S. (1993). Notas sobre el Volcán, *Geofis. Int.*, 32 (4), 699-701.
- Vizcarra, I.G. (1891). Pequeña cartilla histórica de Colima, Colima, 100 pp.
- Waitz, P. (1932). Datos históricos y bibliográficos acerca del Volcán de Colima, *Memoria de la Sociedad Antonio Alzate*, 53, 349-384.
- Wilson, J., R.S.J. Sparks, T.C. Huang and N.D. Watkins (1978). The control of volcanic column heights by eruption energetics and dynamics, *J. Geophys. Res.*, 83, 1829-1836.
- Zobin, V.M., J.F. Luhr, Y.A. Taran, M. Breton, A. Cortés, S. De la Cruz-Reyna, T. Dominguez, I. Galindo, J. Gavilanes, J. Muñoz, C. Navarro, J. Ramirez, G. Reyes, M. Ursua, J. Velasco, E. Alatorre and H. Santiago (2002). Overview of the 1997-2000 activity of Volcán de Colima, México, *J. Volcanol. Geoth. Res.*, 117, 1-19.

*Corresponding author: Rita Fonseca,
 Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México,
 Ciudad Universitaria, Coyoacan Mexico D.F., Mexico;
 email: rifon@geofisica.unam.mx.

Kinematic wind-field model applied to eruptions at Colima Volcano, Mexico

Rita Fonseca¹, Ana Lillian Martin-Del Pozzo² and Ismael Perez³.

Posgrado en Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, Instituto de Geofísica and Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria, Coyoacán, México D. F. México. 04510

Key words: Wind field model, Colima Volcano, Plinian eruptions, anticyclonic, divergent-convergent winds

Abstract

A numerical weather model was applied in order to evaluate wind circulation and atmospheric perturbation, anticyclonic rotation zones and convergent–divergent winds in the Colima Volcano Area. The global diagnostic model for the horizontal wind field was adapted to process the local region to obtain the wind circulation for the Colima Volcano area. Wind circulation patterns were identified to indicate the possible trajectory of the volcanic plumes of an expected Plinian eruption at the volcano in the near-future. The real wind and current and potential functions were obtained in the model with Poisson equations using the Global Gridded Upper Air Statistics (GGUAS) database from the European Centre for Medium Range Weather Forecast (ECMWF). Monthly wind patterns for the 15 atmospheric pressure levels were obtained and divided into 5 groups with similar wind velocity and direction. Dominant winds at the volcano between 500-70mb (5000 and 18000m asl) are from the W y SW from November through May, while from June through October they are from the E, SE y NE. Anticyclonic North American monsoon and divergent winds are present from July to September (250-100mb). Easterly winds dominate from April to October from 20000 to 30000m asl (50-10mb) and W and SE winds from November to March, therefore ash from a 20-30km high plume from an eruption occurring from November to March would go E or NW, during April to October to the west. In April, and November-December anticyclonic circulation in the upper levels can cause fine particles to remain a long time in the atmosphere.

1. Introduction

Knowledge of wind circulation is fundamental in determining the distribution of volcanic plumes. A large eruption is expected at Colima Volcano in western Mexico in the next few years that would send ash over most of Mexico and therefore the interest in diagnostic models for wind distribution. In this paper we propose a kinematic numerical model for the wind field (Fig.1).

Colima Volcano ($19^{\circ}30'44''\text{N}$ y $103^{\circ}37'02''\text{W}$) is one of Mexico's most active volcanoes. Currently, the 4,000 cone is filled summit dome that has been growing slowly causing frequent small landslides on the southwest. An explosion on June 21 cleared away a small part of the dome on the same side.

Colima Volcano (CV) has cycles approximately 100 years long which end in Plinian eruptions (Fig.2). After this type of eruption which clears the crater of a summit dome, another cycle begins, effusive events with short lava flows and several decades of Vulcan an eruptions with ash fall and small pyroclastic flows and the formation of summit domes are then followed by another Plinian eruption (Areola, 1915, Waitz, 1932, Luhr y Carmichael 1990 and Martin-Del Pozzo et al., 1995). Recent activity at the volcano has been similar to the one that precedes these explosive events and the last Plinian eruptions occurred in 1818 and 1913 (Figs.1 and 2) At the end of a cycle, the summit domes were cleared away by eruptions with pyroclastic flows more than 15km long and plumes over 23km high which produced ashfall over half the country (Fonseca and Martin-Del Pozzo, 2010; Saucedo et al. 2010). Now, with the higher population density, new towns growing near the volcano and air traffic in the area, the effects of a Plinian eruption will be more severe

Plinian eruptions are explosive events that last several hours with sustained ash plumes over 20km high that winds carry over extensive areas. Plinian eruptive plumes are divided in three parts: the thrust, convective and horizontal diffusion or umbrella regions (Sparks et al., 1986). Weaker plumes rise by advection and donnot form umbrellas nor generally reach the troposphere and they are asymmetric. The thrust zone is the basal part of the plume with the highest density and high velocities and decelerations. In Plinian eruptions it is up to 4.5km high and the convective zone, the turbulent mixing region, can be over 10 km high. The umbrella lies above

the convective zone and rises until the density of the particles and of the ambient atmosphere is the same and then spreads laterally. Dominant winds then control ash dispersal.

The local kinematic wind-field model for the Colima area is part of a diagnostic model designed for global scales and adapted to the local region to reflect the regional wind patterns which affect the circulation at the volcano. At higher levels westerly winds dominate from November to March while from April to October easterly winds do. With the observed wind characteristics the vorticity and convergent-divergent fields were obtained for Mexico with the diagnostic model. Vorticity is a vector which measures local rotation of the air flow. Different wind velocities produce rotation zone. If vorticity is positive cyclonic circulation associated with low pressure results and wind circulation is counter clockwise in the northern hemisphere. Negative vorticity is anticyclonic circulation associated with a high pressure system and in the northern hemisphere its rotation is clockwise. Convergent zones are produced where wind flow lines meet resulting in convective movement, where air ascends towards low pressure zones. Divergence is produced by wind evacuation in high pressure zones.

If convergent and anticyclonic circulation occurs during an explosive eruption it will produce an anticyclonic convergent spiral at the origin which results in longer residence time for the fine ash. These particles are abrasive and can cause serious damage to aircraft and communications, can cause reduced visibility. Air traffic in Europe was seriously affected by the relatively small Eyjafjallajökull eruption in Iceland in 2010 where more than 100,000 flights were delayed or cancelled because of the ash (Folch et al., 2011). In June 2011, ash from Puyehue in Chile caused flights in Argentina, Uruguay and Brazil to be cancelled. Two different plume directions were caused by changing wind conditions at higher elevations. Volcanic plumes can cause severe damage to aircraft and determining atmospheric circulation patterns in the vicinity of the volcano is fundamental in trying to mitigate the effects an eruption.

2. Methods

Monthly wind data from 1980-1995 from the Global Gridded Upper Air Statistics Database (GGUAS) belonging to the European Centre for Medium Range Weather Forecast .was acquired through the U. S. National Climatic Data Center . The data base was processed in the kinematic

global wind field model which includes Mexico (10°N, 125°W) y (35°N, 85°W). The spatial resolution of the GGUAS database is homogenous and covers 2.5° latitude \times 2.5° longitude. A cylindrical projection was used for maps because it shows the least deformation at the tropics, and spherical coordinates in the calculation and is therefore appropriate for representing atmospheric movement on a large scale.

Calculations for vorticity, divergence and stream and potential function parameters were programmed using Unix-Linux using horizontal wind fields (u, v) geopotential altitude z in standard pressure levels: 10, 30, 50, 70, 100, 150, 200, 250, 300, 400, 500, 700, 850, 1000 mb. Five-hundred and forty maps were produced which correspond to the three parameters that were processed for the 15 atmospheric levels for each month and 20 runs were made for each variable per month for each level. Select representative maps are presented in this paper.

Poisson spectral numerical analysis was carried out using a Gaussian grid on the earth's sphere to obtain the stream and potential functions. The stream function is related to rotation or vorticity zones and the potential function with convergent and or divergent zones on global and regional scales. Monthly maps for rotational or non divergent winds, irrotational or divergent-convergent zones, and real wind field were made for each atmospheric level.

Near Graphic was used to plot the horizontal wind field vectors and the scalar fields of the stream and potential functions. Maps were transformed in the graphic interphase to introduce the atmospheric level and the maximum and minimum increases in order to calculate the isolines for geopotential altitudes and stream and potential functions. The increments varied according to the month and atmospheric level. Results show the mean monthly horizontal displacement and the atmospheric disturbances.

3. Theory of the kinematic horizontal wind field model

Considering a local system of coordinates (x, y, z) on a point on the earth's surface, x to the east, y to the north and z in the vertical direction, and $\mathbf{x}_0 = (x_0, y_0)$ a point located near Colima Volcano, with wind components $\mathbf{u}(\mathbf{x}_0) = (u(x_0), v(x_0)) = (u_0, v_0)$, Then the components of the horizontal wind (direction and intensity) in the vicinity $\mathbf{x}_0 + \mathbf{r}$ around point \mathbf{x}_0 can be approximated as:

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}_0 + \mathbf{r}) = \mathbf{u}(\mathbf{x}_0) + (\mathbf{x} - \mathbf{x}_0) \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial x} \right)_{\mathbf{x}_0} + (\mathbf{y} - \mathbf{y}_0) \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial y} \right)_{\mathbf{x}_0} + \dots \quad (1)$$

where $\mathbf{r} = \mathbf{x} - \mathbf{x}_0$ y $\mathbf{x} = (x, y)$. If $\mathbf{x}_0 = (0, 0)$ previous equations can be simplified and expressed in matrix form as:

$$\begin{pmatrix} u(x) \\ v(y) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_0 \\ v_0 \end{pmatrix} + \frac{1}{2} \begin{pmatrix} \delta & 0 \\ 0 & \delta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 0 & -\zeta \\ \zeta & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \frac{1}{2} \begin{pmatrix} T & 0 \\ 0 & -T \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 0 & H \\ H & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$= \mathbf{u}_0 + \mathbf{u}_\delta + \mathbf{u}_\zeta + \mathbf{u}_T + \mathbf{u}_H$$

where $\delta = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}$, represents the horizontal wind divergence; $\zeta = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$, the vertical component of the vorticity $H = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}$, shearing deformation and $T = \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y}$, the deformation by stretching.

Equation (2) represents the linear variation in the velocity field near point \mathbf{x}_0 (Dutton, 1986). If we consider only the first term (2) we are looking at the simplest translation motion $\mathbf{u}(\mathbf{x}_0) = u_0(\mathbf{x}_0) \mathbf{i} + v_0(\mathbf{x}_0) \mathbf{j}$, where \mathbf{i}, \mathbf{j} are unitarian vectors along the axis x, y .

But, considering a field of movement where only horizontal divergence exists δ ($\zeta = T = H = 0$), in the equation (2) can be expressed as:

$$\begin{pmatrix} \frac{dx}{dt} \\ \frac{dy}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\delta}{2} & 0 \\ 0 & \frac{\delta}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (3)$$

Where the matrix 2×2 is diagonal and has eigen values $\lambda_1 = \frac{\delta}{2}$ y $\lambda_2 = \frac{\delta}{2}$ then the solution for stream lines $\frac{dy}{dx} = \frac{v}{u} = \frac{y}{x}$, are stream lines $\begin{pmatrix} x(t) \\ y(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_1 e^{\lambda_1 t} \\ c_2 e^{\lambda_2 t} \end{pmatrix}$ convergent at the origin if $\delta < 0$ (Fig. 3a) and divergent if $\delta > 0$ (Fig. 3b).

But considering now a field of movement where only vorticity exists ζ ($\delta = T = H = 0$) in the equation (3) we have:

$$\begin{pmatrix} \frac{dx}{dt} \\ \frac{dy}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & \frac{-\zeta}{2} \\ \frac{\zeta}{2} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (4)$$

Integrating the last system we obtain a family of concentric current lines to the origin. The character of this type of movement can be easily revealed using polar coordinates (r, θ) , with θ increasing counterclockwise from the x axis and r radius from origin of the local coordinate system. Then $x = r \cos \theta$, $y = r \text{ sen } \theta$ y $r = \sqrt{x^2 + y^2}$. Where an orthogonal set $(\mathbf{e}_r, \mathbf{e}_\theta)$ is generated from unitarian vectors, \mathbf{e}_r in the radial direction and \mathbf{e}_θ in the tangential direction where θ increases. Then the wind projection u in the radial direction $\hat{\mathbf{e}}_r$ is u_r and u_θ the wind projection \mathbf{u} in the tangential direction \mathbf{e}_θ .

Using polar coordinates for resolving (4) if we consider that $r(t) = r(0)$ y $\theta(t) = \theta(0) + \frac{\zeta}{2} t$.

Then the solution in the plane allows us to obtain that:

$$\begin{pmatrix} x(t) \\ y(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r(0) \cos[\theta(0) + \frac{\zeta}{2} t] \\ r(0) \text{ sen}[\theta(0) + \frac{\zeta}{2} t] \end{pmatrix} \quad (5)$$

Where if $\zeta > 0$ cyclonic circulation is attained (Fig. 3c), and if $\zeta < 0$ the ash plume will have an anticyclonic circulation.

Supposing that near the volcano convergent or divergent zones and vorticity exist ($T = H = 0$), equation (2) is converted to

$$\begin{pmatrix} \frac{dx}{dt} \\ \frac{dy}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\delta}{2} & \frac{-\zeta}{2} \\ \frac{\zeta}{2} & \frac{\delta}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (6)$$

The general solution for this equation according to Hirsch and Smale (1974):

$$\begin{pmatrix} x(t) \\ y(t) \end{pmatrix} = e^{t\frac{\delta}{2}} \begin{pmatrix} k_1 \cos t\frac{\zeta}{2} - k_2 \sin t\frac{\zeta}{2} \\ k_2 \cos t\frac{\zeta}{2} - k_1 \sin t\frac{\zeta}{2} \end{pmatrix} \quad (7)$$

Where the constants $k_1, y k_2$ are related to the initial position of the ash or air parcel, if there are convergent fields $\delta < 0$ and cyclonic circulation $\zeta > 0$, then the configuration of the stream line pattern represents a cyclonic spiral convergent to the origin (Fig, 3d); with anticyclonic circulation $\zeta < 0$, then anticyclonic spirals convergent to the origin are obtained.

On the other hand, if in the upper troposphere near Colima Volcano there are divergent fields $\delta > 0$, that is common in summer, and anticyclonic circulation $\zeta < 0$, then anticyclonic divergent circulation is present which is frequent in the Mexican monsoonic circulation and in the anticyclonic divergent circulation of the tropical cyclones.

When all movements in equation (2) are present the analytical solution is more complicated, reason why we are focusing on the local region from a global analysis. In this paper movement was approximated as

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_\delta + \mathbf{u} = \nabla\chi + \mathbf{k} \times \nabla\psi$$

Where ∇ is the horizontal gradient, \mathbf{k} is the unitarian vector along axis z, \mathbf{u}_δ is the divergent or irrotational wind and \mathbf{u}_ζ is the rotational or non divergent wind. These winds are expressed in terms of the potential function χ , and the stream function ψ respectively are:

$$\mathbf{u}_\delta = \mathbf{u}_\delta(\chi) = \mathbf{u}_\chi \text{ y } \mathbf{u}_\zeta = \mathbf{u}_\zeta(\psi) = \mathbf{u}_\psi \text{ (Pérez, 1985).}$$

The measure of divergence or convergence associated with the potential function is $\delta = \nabla \cdot \mathbf{u} = \nabla^2\chi$, and the measure of vorticity associated with the stream function is $\zeta = \mathbf{k} \cdot \nabla \times \mathbf{u} = \nabla^2\psi$. Therefore if ζ and δ are given, the numerical global method resolves the Poisson equations for ψ and χ :

$$\Delta\psi = \zeta$$

$$\Delta\chi = \delta$$

Where $\Delta = \nabla^2$ is the Laplace operator on the sphere using a Gaussian grid on the earth's surface.

4. Diagnosis of the horizontal wind field above Colima Volcano

The results of the monthly analyses of the Global Gridded Upper Air Statistics database using the global and regional diagnostic model are presented in five groups with similar wind velocity and direction (Table 1). The lower groups were started at 3000m asl since Colima Volcano is nearly 4000m asl and the main objective was to identify wind circulation for possible scenarios in case of an explosive eruption with high plumes.

Maps correspond to the observed wind field and stream and potential function fields associated with rotation and convergence and divergence zones. In each map the respective wind field is given on isobaric surfaces each 2.5° latitude $\times 2.5^\circ$ de longitude. The observed wind and its relative geopotential altitude, non-divergent wind \mathbf{u}_ψ , contours of the stream function ψ and the divergent wind \mathbf{v}_χ with the contours of the potential function are shown in Figures 4-10. Two air parcels that are at the same isobaric surface can have 2 different geopotential altitudes and therefore have different potential energy.

Group 1 (middle troposphere) comprises the 700 to 500mb.atmospheric pressures corresponding to altitudes between 3000 and 5800m asl. In the Colima Volcano area above 3000m asl (700mb), anticyclonic divergent circulation is present over central Mexico which includes Colima Volcano (Fig.4A). Winds from the SW dominate from November to May and form anticyclonic divergent circulation from the Pacific to the Gulf of Mexico which includes Colima Volcano (4B and 4C). From October to June winds from the E y SE are dominant (Figure 4D).

Winds from the W are dominant at 500mb (5800 m) from November to April and if a small eruption with an ash cloud less than 1.5 km high occurs then it would go east (Fig.5A). Anticyclonic circulation is recurrent in May, June, September, October and December (Figs. 5B-5D). Wind velocities vary from 0.2 m/s in March, June and September to 31m/s in January.

Group II. (Upper Troposphere) consists of pressure levels at 400, 300, 250 and 200mb that correspond to 7000, 9000, 10000 and 12000 m asl. At Colima Volcano winds from the W and SW are dominant from October through May (Figs.6A-D) while in July and August, winds from the E and NE associated with the North American Monsoon are.

A monsoonic anticyclone is observed at 400-250mb (7000-10000 m) in July and September. An ash plume 4000 to 8000 m high would travel to the S-SE and fine particles would circulate around the volcano and remain longer in the air. According to our model, the ash cloud would form an anticyclonic divergent spiral. Wind intensity varies between 1 m/s in June and September and 32-48 m/s between January and April.

Group III (Lower Stratosphere) is made up of the 150 to 100mb pressure levels and corresponds to 1400 to 1600m asl. At this altitude, winds at Colima Volcano area are from the W from October to May and present anticyclonic circulation in June and September (Fig.7A). In July and August winds from the E and NE associated with the monsoon anticyclone, dominate (Figs. 7B and 7C). From May to September divergent winds are present at the volcano (Fig. 7D). Wind intensity varies from less than 1m/s between June and September to 35-41m/s between January and April.

Group IV (Lower Stratosphere) consists of the 70 to 50mb pressure level corresponding to altitudes of 18000 y 20000 m asl. Winds from the W dominate at Colima from November to April at 70mb and from December to March at 50mb (Figs. 8A, 8B y 8C). Southwest of Colima Volcano anticyclonic circulation is present in May at 70mb (Fig. 8D) and at 50mb winds from the E dominate from April to October (Figs. 9A, 9B and 9C). In this same atmospheric level, two rotation zones in April, November and December form near the volcano to the west, over the Pacific and to the east, which affect wind circulation in the area (Fig. 9D). Minimum wind intensity was 0.1-0.2 m/s in March, September, October and November and the maximum was 17-19 m/s in January and December.

Group V (Middle Stratosphere) corresponds to 30-10mb atmospheric pressures at 23000-30000 m asl. At these altitudes, winds are from the E and SE from April to October (Figs. 10A-10C). Winds from the W-SW are present from November to March in the Colima area (Fig. 10D), but

in November at 30mb (23000 m asl) winds from the east dominate. Intensities vary from 0.1 m/s in January-March and November to 21-28 m/s in July and August.

5. Discussion

The results of the regional horizontal wind field model we are proposing for the Colima area extend the study of the local vertical wind analysis of the Manzanillo and Guadalajara meteorological stations which are near Colima Volcano (Fonseca and Martin Del Pozzo, 2010). Authors present 7 scenarios based on the daily radiosonde wind data reported monthly (1990-2005) from 17000-28000 m asl which are consistent with the principal mean monthly wind component of the horizontal wind field in our model.

A volcanic ash plume above 20km occurring in January, February or March will travel toward the E or NE, while during the summer it would go west, and local winds will drive it toward the NW in April, November and December. Pacific anticyclonic circulation can cause wind displacement toward the west and circulation from Yucatan toward the east affecting the Colima Volcano area. The principal mean monthly wind component has easterly displacement during May but may vary to the NNE and NNW depending on local winds.

A summary of the mean monthly wind field direction for 500-10mb in the Colima area is shown in Figure 11. Winds from the SW and W dominate at 500-100mb from November through May and from the E and NE from June to October. Northeasterly winds present anticyclonic circulation in the Colima Volcano area and are associated with the North American Monsoon. Winds from the E are dominant from October to April at 70 to 10mb.

From 70 to 30mb the dominant winds are from the E in April through October while winds from the W also occur in April and November. Changing wind directions in November, December and April are related to anticyclonic circulation which forms in the Pacific to the west and over Yucatan to the east of the volcano. This situation also produces anticyclonic circulation at the area.

6. Conclusions

Processing the GGUAS database with the adapted kinematic horizontal wind field model for the 15 atmospheric levels resulted in maps with the mean monthly direction of the main wind component. From the model we identified dominant winds at Colima Volcano and rotation convergent and divergent zones. Winds from the W and SW dominate from November through May, from the E, SE y NE from June through October at 500 to 70mb. Easterly winds dominate from April through October and winds from the W y SE from November through March at 50 to 10 mb.

In a Plinian eruption winds at 50 a 10mb can control ash distribution. Volcanic plume more than 20km high would travel west from April through October but from November through March would to the E or NW. In April, November and December, two anticyclonic circulations form in the Pacific to the west of the volcano and to the east, ash from a plume over 20km high would go westward to the Pacific and also to the east and central part of the country, where most of the economic activity takes place and the area with the highest population density.

Anticyclonic divergent circulation near the volcano associated with the North American anticyclonic monsoon also forms from July to September at 250 to 100mb. In case of an eruption at Colima Volcano with a plume 10-16m asl during summer, it would behave like a divergent anticyclonic spiral. The convergent winds that are found in northern Mexico during summer 70-50 mb at are not present in the Colima area.

The results of this model can also be applied to other active volcanoes in Mexico such as Popocatepetl, Pico de Orizaba, Ceboruco and El Chichon.

References

- Folch, A., Costa, A., and Basart, S., 2011. Validation of the Fall 3D ash dispersion model using observations of the 2010 Eyjafjallajokull volcanic ash clouds. Atmospheric environment. doi:10.1016/j.atmosnv.2011.06.072
- Fonseca, R. and Martin-Del Pozzo, A. L., .2010. Ash-fall hazard from a Plinian Eruption at Colima Volcano, Mexico. Annals of Geophysics. 53, 5-6, 51-81. doi: 10.4401/ag-4872

Hirsch, M.W, Smile S. 1974. Differential equations, dynamical system and linear algebra. Academic Press. p.358

Luhr, J.F., Carmichael, I.S.E., 1990. Geology of Volcán the Colima. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología. 107:101-107

Martin Del Pozzo, A. L., Sheridan, M, Barrera, D., Lugo, H. J and Vázquez, S. L, 1995. Potencial hazards from Colima Volcano. Geof Intern. 34:43. 363-376

Pérez-García, I., 1985. Un análisis semiobjetivo para el campo de viento en los trópicos. Geof Intern 24-3: 425-437.

Saucedo, R., Macías, J. L., Gavilanes, J. C., Arce, J. L., Komorowski, C., Gardner, J. E., Valdez-Moreno, G . 2010. Eyewitness, stratigraphy, chemistry, and eruptive dynamics of the 1913 Plinian eruption of Volcán de Colima, México. J Volc Geoth Res

Table heading

Table 1. Groups based on atmospheric level (altitude) for the horizontal wind field.

Figure Captions

Figure 1. Ash distribution of Colima Volcanoes historical eruptions. (modified from Martin Del Pozzo et al., 1995).

Figure 2. Colima Volcano's historic eruptive cycles (Modified from Martin Del Pozzo et al., 1995).

Figure 3. A). Stream lines of the convergent wind. B). Stream lines of the divergent wind. C). Rotational cyclonic movement. D). Convergent movement with cyclonic circulation.

Figure 4. Wind circulation at 700mb showing Colima Volcano (dot). Each column of maps shows the real wind, rotation and convergent and divergent zones for the months that are mentioned. A.) October. B) and C). In January and April winds from the SW and a rotation zones are present in the Colima area and D). In July winds from the SE cover most of the area

Figure 5. Wind circulation at 500mb showing Colima volcano (dot). Distribution of map columns are the same for figures 4-10. A) In March at 500 mb dominant winds are from the W. B) and C). In June and September anticyclonic circulation forms in central Mexico. D). Winds from the SW and anticyclonic circulation are present in December.

Figure 6. Wind field at 300mb A). In October dominant winds are from the west. B) and C). Winds in December and February are from the SW. D). Dominant winds in April are from the W.

Figure 7. Wind field at 100mb. A). Widespread divergent anticyclonic circulation is seen in June associated with the North American anticyclonic monsoon. B) and C). Winds in July and August are from the E and NE. D). September shows anticyclonic divergent circulation in northwest Mexico which affects the Colima area.

Figure 8. Wind field at 70mb. A). November shows winds from the west and a rotation zone. B).and C). In January and March winds are from the W. D). In May winds are from the W and there is anticyclonic circulation in the volcano area.

Figure 9. Wind field at 50mb. A). In May, July and September winds there are from the East . B). and C). Easterly winds dominate in July and September. D). Westerly winds dominate in November.

Figure 10. Wind field at 10mb. A), B) and C). Winds in May, July and September are from the E and show anticyclonic divergence. D). Winds from the W and E are observed in November with two anticyclonic circulations.

Figure 11. Wind field for the Colima area from 500 to 10mb.

GROUP	I	II	III	IV	V
ATMOSPHERIC LEVEL	700, 500,	400, 300, 250, 200	150, 100	70, 50	30, 10
ALTITUDE (msl)	3000, 6000	7000, 9000, 10000, 12000	14000 16000	18000 20000	23000 30000

